

2 | 2023

VBio

Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

**ANTARKTIS-
FORSCHUNG**

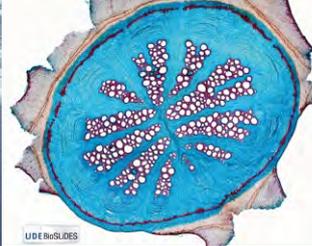
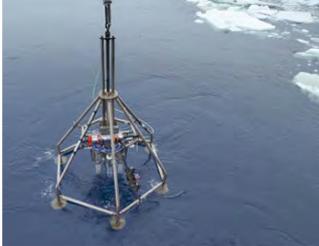
Ökosystemfunktionen

**VIRTUELLE
MIKROSKOPIE**

Datenbank für die Lehre

MODELLTECHNIK

3D-Druck
in der Biologie



BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

**Wenn
Schnecken
Chloroplasten
rauben**



Biologische Bildung – ein zentrales Anliegen des VBIO



LRSD' a. D. Marga Radermacher ist Sprecherin der Landesverbände im VBIO und Mitglied im Präsidium des Verbands. Beruflich war sie vor ihrer Pensionierung Fachdezernentin für Biologie und Ernährungslehre bei der Bezirksregierung Köln.

Liebe Leserinnen und Leser, liebe Mitglieder des VBIO, Lernerneut ist das deutsche Bildungssystem auf dem Prüfstand. Die Probleme wie Lehrkräftemangel, fehlende Kompetenzen bei Schülerinnen und Schülern, hohe Abbrecherquoten an Schule und Hochschule sowie die Herausforderung der Digitalisierung belasten das Bildungssystem, setzen es unter Druck. Jedoch der Bildungsgipfel in Berlin enttäuscht, zumal etliche für Bildung zuständige Minister der Länder nicht teilgenommen haben. Unter der Überschrift „Chance Bildung“ brachte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) am 14. und 15. März 2023 Akteure aus der Praxis, Wissenschaft und Politik im *Berlin Congress Center* zusammen. Der Handlungsdruck ist groß für Bundesbildungsministerin Bettina Stark-Watzinger. In ihrer Keynote [1] umriss sie die Gesamtproblematik (siehe oben), beschrieb finanzielle Anstrengungen und hinterfragte den zielgerechten Einsatz bisher geflossener Gelder – insbesondere im Nachgang zu Corona – und fasste zusammen: „Bildung kostet Geld und Bildung ist ein Schatz“. Wir alle wissen, sie ist nicht nur ein Schatz – sie ist der einzige Rohstoff, den dieses Land hat, und wir sind dabei diesen zu verlieren! Stark-Watzinger betonte die Notwendigkeit eines breit angelegten Bildungsmonitorings und hielt fest: „Wir brauchen Wissenschaft und kein Bauchgefühl.“ Sie beschwor ein gemeinsames Handeln, ein Miteinander aller, die Verantwortung für Bildung tragen. Das Resultat: Das Bildungsministerium plant die Einsetzung einer Taskforce „Team Bildung“. Weitere, konkrete, schon jetzt greifende Beschlüsse, Zielsetzungen und Vereinbarungen gab es leider nicht.

Der VBIO betrachtet diese aktuellen Entwicklungen mit großer Sorge. Er sieht sich in der Verantwortung und sucht in seinen Gremien nach Wegen der Qualitätssicherung von Bildung in Schule und Hochschule sowie Weiter- und Fortbildung. Aber auch außerschulisches Lernen und lebenslanges Lernen sind für den VBIO wichtige Elemente einer ganzheitlichen Bildungssystematik [2]. Um hier konstruktiv und sachgerecht mitzuwirken, hat er sich entsprechend aufgestellt. So setzt sich der AK Schulbiologie (<https://www.vbio.de/schule/schule>) unter der Leitung von Prof. Benedikt Heuckmann (Zentrum für Didaktik der Biologie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster) und StD Dr. Christian Rosar (Fachbereichsleiter III, Augustinerschule Friedberg, Hessen) bundesweit für einen exzellenten Biologieunterricht ein sowie für einen möglichst raschen Transfer biowissenschaftlicher Erkenntnisse in den Biologieunterricht. Der AK Schulbiologie arbeitet mit den Landesverbänden des VBIO sowie der Sektion Fachdidaktik der Biologie (FDdB) im VBIO eng zusammen. 2019 entstanden wegweisende Positionspapiere zur Schulbiologie [3] und zur Lehrkräftebildung [4], die wichtige Aspekte eines zukunftsorientierten Biologieunterrichts enthalten. Didaktiker/-innen und Wissenschaftler/-innen sowie Lehrkräfte, die aus der Praxis berichten, arbeiten im AK Schulbiologie des VBIO eng zusammen, um den oben genannten Zielen gerecht zu werden.

Bildungspolitik ist Ländersache – folglich setzen sich auch die Landesverbände des VBIO (<https://www.vbio.de/landesverbaende>) für die Biologielehre an Schulen und Hochschulen ein. Sie kommentieren zum Beispiel Studentafeln und Lehrpläne, bieten Fortbildungsveranstaltungen an oder unterstützen biologisch-naturwissenschaftliche Wettbewerbe wie z. B. die „Internationale Biologie-Olympiade“. Der AK Schulbiologie holt schon seit Jahren Vertreter/-innen aus allen Ländern an einen Tisch, reflektiert den jährlichen Ist-Stand, diskutiert aktuelle Probleme, vergleicht Angebote und Bildungsanstrengungen aller Länder, sucht und entwickelt konsensual Lösungen, die sich in Positionspapieren für die Öffentlichkeit sichtbar niederschlagen und vom Verband an wichtige Entscheidungsträger in der Bildungspolitik überreicht werden.

Heuckmanns und Rosars Aussage „Mit dem Schulfach ‚Biologie‘ komplexe Herausforderungen und Zukunftsfragen besser verstehen“ [5] zielt auf weit mehr als nur Schule; die Autoren stellen mit diesem Satz die Schlüsselrolle heraus, die die Leitwissenschaft Biologie gesellschaftspolitisch innehat. Die Komplexität unserer Lebenswelt nimmt rasant zu; wird beschleunigt durch Technologien, die naturwissenschaftliche und medizinische Forschung und Anwendung maßgeblich beeinflussen. Und trotz zunehmender Digitalisierung wird es immer schwerer die notwendigen und richtigen Entscheidungen zu treffen, die wissenschaftlich fundiert, Folgenabschätzung und damit Nachhaltigkeit im Blick haben. Zukunftsfragen müssen gelöst werden und dafür braucht es Bildung – Schaffung von Kompetenzen für die Zukunft. Bezogen auf die Biologie müssen diese breit angelegt sein und dafür ist ein umfassendes Instrumentarium vonnöten, um diese so existenziell notwendigen Kompetenzen zu vermitteln und nicht nur mit Blick auf Schule oder Hochschule.

Seit gut zwei Jahren gibt es zusätzlich zum AK Schulbiologie ein weiteres Gremium, den Ständigen Ausschuss „Bildung“, der sich direkt aus Mitgliedern des Präsidiums zusammensetzt und zusätzlich Expert/-innen aus der Wissenschaft und Lehre hinzugezogen hat. An diesem Gremium wird besonders deutlich, wie hoch der Stellenwert von Bildung beim VBIO angesetzt wird. Die Leitung hat hier Prof. Kerstin Kremer (Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Biologiedidaktik) und unterstützt wird sie durch Prof. Robert Hänsch (TU Braunschweig, Institut für Pflanzenphysiologie) sowie LRSD' a. D. Marga Radermacher (ehemals Fachdezernentin für Biologie und Ernährungslehre, Bezirksregierung Köln); alle drei sind Mitglieder des Präsidiums. Die Zielsetzung ist wie die im AK Schulbiologie eine gute, umfassende biologische Grundbildung und zwar im Sinne einer zu erreichenden *Scientific Literacy* (siehe unten). Dieser Ausschuss beobachtet die Arbeit an Schulen und Hochschulen mit ihren Akteuren wie Schüler/-innen, Studierenden und Lehrenden. Die Sicherstellung der Qualität der Lehre in der Verschränkung fachwissenschaftliche Sachkompetenz und Didaktik erfordert die Verfügbarkeit einer

großen Bandbreite von Parametern, die bei Gebäuden und Ausstattung – insbesondere medientechnisch – anfängt und bei gut ausgebildetem Personal aufhört. Die Zusammensetzung dieses Ausschusses macht es möglich, dass der VBIO sich qualifiziert zu aktuell drückenden Problemen im Bildungssystem äußern kann. Die dort vorhandene Expertise lässt es zu, sachlich fundierte Lösungsvorschläge auf vielen Feldern des Bildungssystems zu entwickeln und empfehlend der Öffentlichkeit und den Entscheidungsträgern zur Verfügung zu stellen. Ein aktueller Arbeitsschwerpunkt ist die Digitalisierung der Lehre in Schule und Hochschule. Von großer Brisanz ist auch der akute Lehrkräftemangel im Fach Biologie und entsprechende Überlegungen, wie diesem begegnet werden kann (siehe Artikel „Gute Lehrkräftebildung auch in Zeiten von Lehrkräftemangel sichern“ im Teil „Politik und Gesellschaft“ in diesem Heft).

Zwei ganz neue Initiativen gingen vom Ständigen Ausschuss für „Fachgesellschaften und Landesverbände“ aus, der von Prof. Felicitas Pfeifer (TU Darmstadt, Fachbereich Biologie, Mikrobiologie und Archaea), Sprecherin der Fachgesellschaften im VBIO, und Marga Radermacher (siehe oben), Sprecherin der Landesverbände, gemeinsam geleitet wird. Unter der Federführung von Pfeifer wurde das Format „Dialogforum“ entwickelt – moderierte Diskussionen zu einem fachübergreifenden Thema aus verschiedenen Blickwinkeln. In dieser digitalen bundesweiten Veranstaltung treten nach ihren Impulsvorträgen die geladenen Wissenschaftler/-innen untereinander in den Dialog und gehen auf Fragen und Diskussionsbeiträge der Zugeschalteten ein. Die Anwesenden nehmen aktiv teil an einem perspektivreichen Wissenschaftsdialog, der eigene Forschung und sich daran knüpfende gesellschaftliche, politische bis hin zu ethischen Fragestellungen zur Diskussion stellt.

Radermacher initiierte das Angebot einer Vortragsreihe „Faszination Biologie“, um biologische Sachkompetenz direkt über Wissenschaftler/-innen erfahrbar zu machen und die eigene vertiefen zu können (siehe Artikel „Faszination Biologie – eine Reihe mit Vorträgen aus der Wissenschaft“ im Teil „Politik und Gesellschaft“ in diesem Heft). Denn der VBIO verfolgt mit Sorge, dass seit der Umstellung auf das Bachelor- und Masterstudium z. B. die angehenden Lehrkräfte als wichtige Multiplikator/-innen mit deutlich weniger gesichertem Fachwissen in die Lehrkräfteausbildung gehen oder aber die Menschen in unserer Gesellschaft nicht hinreichend über wissenschaftliche Themen informiert sind. Gute Bildung fördern heißt für den VBIO aber auch Anreize geben und gute Leistungen im Kontext der Biologie auszuzeichnen. Der Karl-von-Frisch-Preis ist eine solche Auszeichnung, mit dem die besten Abiturient/-innen eines Jahrgangs nach festgelegten Kriterien für herausragende Leistungen im Fach Biologie geehrt werden.

Nicht zuletzt ist die Herausgabe der Verbandszeitschrift „Biologie in unserer Zeit“ (BiuZ) ein weiteres wichtiges Instrument zur Vermittlung und Sicherung biologischer Bildung. Die Zeitschrift, die Sie, liebe Leserinnen und Leser, gerade in den Händen halten, gibt Einblicke in komplexe Zusammenhänge und in das breite Spektrum

der Biologie. Namhafte Autor/-innen stellen in farbig illustrierten Übersichtsartikeln neue Forschungsergebnisse vor. Die Zeitschrift informiert Sie über politische und gesellschaftliche Entwicklungen im Kontext der Biologie, der Biowissenschaften und der Biomedizin. Die momentane Verdichtung von Problemen wie Lehrkräftemangel, fehlende Kompetenzen bei Schüler/-innen erzeugt einen immensen Druck auf alle Verantwortlichen. Ist Bildung also erneut in der Krise?

Der Bildungsbegriff ist dynamisch! Er muss Transformationen in Gesellschaft, Politik, Wirtschaft und Kultur Rechnung tragen und sie begleiten. Gleichzeitig muss Bildung global angelegt sein. Nationale Lösungen sind zu eng gedacht und eignen sich kaum, die anstehenden Probleme zu bewältigen. Dies gilt im besonderen Maße für die Biologie. Biologische Bildung muss heute viele Kompetenzen aufbauen und stärken und verlangt deshalb eine Form der Bildung, die mit *Scientific Literacy* treffender erfasst wird. Dabei ist Wissen, also Sachkompetenz, zwar ein wesentliches Fundament. *Scientific Literacy* steht jedoch für ein Gefüge verschiedener Kompetenzen. Biologische Bildung heißt auch, vor dem Hintergrund von Sachkompetenz bewerten (ethisch-moralische Kompetenz) und in individueller und gesellschaftlicher Verantwortung handeln zu können (Handlungskompetenz mit den einzelnen Domänen von Lernkompetenz, kommunikativer, sozialer und prozeduraler Kompetenz). Nach Gräber et al. [6] subsumiert *Scientific Literacy* die oben genannten Kompetenzen und Domänen für naturwissenschaftliche Bildung und macht so deren Vielschichtigkeit und damit hohe Komplexität deutlich.

Der VBIO stellt sich diesen Herausforderungen an „Komplexität“ und „Vielschichtigkeit“ auf vielen für Bildung so notwendigen Ebenen: Wissenschaft, Kommunikation, Didaktik, Digitalisierung. Er reagiert breit aufgestellt mit der ihm zur Verfügung stehenden Expertise und setzt Impulse, er verfasst Standpunkte und umfassende Stellungnahmen beispielsweise zu Bildungsplänen. Er lädt namhafte Wissenschaftler/-innen ein, sich digital bundesweit und darüber hinaus für ein breites Publikum in einen bildungsrelevanten Dialog einzubringen. Hier treffen großes Interesse an Wissen und beeindruckende Bereitschaft sich in den Dialog zu begeben, katalysiert durch den VBIO, aufeinander.

- [1] <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/veranstaltungen/2023/bildungsgipfel-2023.html>
- [2] https://www.vbio.de/fileadmin/user_upload/Schule/pdf/2021_nicht-formale_Bildung_A.pdf
- [3] <https://www.vbio.de/schule/schule/schulbiologie>
- [4] <https://www.vbio.de/schule/schule/lehrkraeftebildung>
- [5] B. Heuckmann, C. Rosar (2023). Mit dem Schulfach ‚Biologie‘ komplexe Herausforderungen und Zukunftsfragen besser verstehen – ein Gastbeitrag AK Schulbiologie des VBIO e. V. Profil (DPHV). Das Magazin für Gymnasium und Gesellschaft. Heft 3/2023. Seite 14–15.
- [6] W. Gräber et al. (2002). *Scientific Literacy*. Der Beitrag der Naturwissenschaften zur Allgemeinen Bildung. Opladen: Leske & Budrich. Seite 136/137.

Ihre



Biologie in unserer Zeit ist die Verbandszeitschrift des Verbandes Biologie, Biowissenschaften & Biomedizin in Deutschland – VBIO e.V. Mehr Informationen finden Sie im Internet unter www.vbio.de.

Verlag:

Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland – VBIO e.V.
Corneliusstr. 12, 80469 München
Telefon +49 (0)89/26 02 45 73
Email: biuz@vbio.de

Alleinvertretungsberechtigter Vorstand:
Prof. Dr. Karl-Josef Dietz, Bielefeld (Präsident)
PD Dr. Christian Lindermayr, Friedberg (Schatzmeister)

Managing Editor:

Dr. Larissa Tetsch (verantwortlich für den Inhalt),
Steinröselweg 9, 82216 Maisach;
Telefon +49 (0)81 41/8 88 06 27
Email: redaktion@biuz.de

Editorial Board:

Erwin Beck, Bayreuth
Ralf Dahm, Mainz
Harald Engelhardt, Martinsried
Jacob Engelmann, Bielefeld
Monika Hassel, Marburg
Christian Körner, Basel
Wolfgang Nellen, Kassel (Chief Editor)
Hannes Petrischak, Wustermark
Felicitas Pfeifer, Darmstadt
Michael Riffel, Hirschberg
Udo Schumacher, Hamburg
Marco Thines, Frankfurt

Herstellung:

Dr. Larissa Tetsch,
Telefon +49 (0)81 41/8 88 06 27
Email: redaktion@biuz.de

Anzeigenleitung:

Dr. Carsten Roller, Corneliusstr. 12, 80469 München
Telefon +49(0)89/26 02 45 73
Email: roller@vbio.de

Mitglieder- und Abo-Service:

VBIO e.V., Geschäftsstelle München,
Corneliusstr. 12, 80469 München
Telefon +49(0)89/26 02 45 73 · Fax +49(0)89/26 02 45 74
Email: mitgliederservice@vbio.de

Preise:

Bibliotheken und Organisationen: Bitte Rückfrage
Bei VBIO-Mitgliedschaft inklusiv
<https://vbio.de/beitritt>

Geschäftsstellen des Verbandes:**Geschäftsstelle München**

Dr. Carsten Roller, Corneliusstraße 12, 80469 München
Telefon +49(0)89/26 02 45 73, info@vbio.de

Geschäftsstelle Berlin

Dr. Kerstin Elbing, Luisenstraße 58/59, 10117 Berlin,
Telefon +49(0)30/27 89 19 16, elbing@vbio.de

Satz:

TypoDesign Hecker GmbH, Leimen.

Druck und Bindung:

ColorDruck Solutions GmbH, Leimen.

© VBIO e.V., München, 2023.

Printed in the Federal Republic of Germany.
ISSN 0045-205 X

BIOLOGIE

2 | 2023 IN UNSERER ZEIT

www.biuz.de



Unser Titelbild zeigt die grüne Samschnecke (*Elysia viridis*), die auf ihrer Futteralge *Bryopsis hypnoides* weidet. *Elysia* gehört zu den Schlundsackschnecken (*Sacoglossa*), von denen einige Arten als „Chloroplasten-Räuber“ bekannt sind. Diese Schnecken bauen Chloroplasten ihrer Nahrungsalge in ihr Cytosol ein. Im tierischen Cytosol bleiben die Chloroplasten, abhängig von der Schneckenart, mehr oder weniger lange photosynthetisch aktiv. Dieser Vorgang wird als funktionale Kleptoplastie bezeichnet und ist im Tierreich einzigartig. Wie die Schnecken Chloroplasten rauben, in ihrem Cytosol behalten, und welche Vorteile sich vermeintlich daraus ergeben, lesen Sie in unserem Titelthema auf S. 155. Foto: Cláudio Brandão.

MELDUNGEN

106 Forschung & Entwicklung, Standorte, Lebendiger See des Jahres 2023, Ausstellungen

POLITIK UND GESELLSCHAFT

- 112** IUBS – die Vertretung der Biologie auf internationaler Ebene
114 Faszination Biologie – eine Reihe mit Vorträgen aus der Wissenschaft
117 Nach der ersten Ernte: Wie war das mit dem *Golden Rice*?
119 Ohne Grundlagenforschung keine Nachhaltigkeit
122 Gute Lehrkräftebildung auch in Zeiten von Lehrkräftemangel sichern
124 Arbeitsfähigkeit der ZKBS gefährdet

TREFFPUNKT FORSCHUNG

- 126** Meeresbiologie in der Praxis: Eine studentische Exkursion in die marinen Lebensräume des Mittelmeeres
129 DNA-Methylierung und Temperaturanpassung von Austern im *common-garden*-Experiment
130 Bringt Gewebe in Form: die Basallamina
132 Künstliche Intelligenz in der Mikroskopie
135 Wie sich Vogelspermien bei der Fixierung verändern
136 Wie die Zygote aus den Startlöchern kommt

MAGAZIN

- 188** Bücher und Medien
191 Außerschulische Lernorte: Der Zoo Krefeld: BNE-Regionalzentrum, Zooschule und mehr
194 Mikroben verstehen: Mikroben leben in einer anderen Welt – Diffusion
196 Partner des Menschen: Das Hausrind: Eiweißlieferant und Zugtier
198 Kolumne: Clustering-Illusion

IM FOKUS

- 138** Ökosystemfunktionen im Südpolarmeer
Heike Link, Gritta Veit-Köhler
- 148** Gasvesikel und ihr Einsatz in der Biomedizin
Felicitas Pfeifer
- 155** Funktionale Kleptoplastie in Meeresnacktschnecken
Katarina Kodžoman, Jenny Melo Clavijo, Corinna Sickinger, Gregor Christa
- 164** Virtuelle digitale Lichtmikroskopie in der Lehre
Michael Kloster, Bánk Beszteri
- 172** Vom biologischen Vorbild zum 3D-Universum
Hartmut Böhm
- 180** Draußenschulbewegung in Deutschland
Jakob von Au, Ulrich Gebhard

138 Ökosystemfunktionen im Südpolarmeer



Die Lebewesen am Meeresboden spielen eine wichtige Rolle für die Stoffkreisläufe in den Ozeanen. In der Antarktis ist ihre Aktivität nicht nur von der Nahrungsmenge abhängig. Auch die Ausdehnung des Meereseises beeinflusst ihre Funktionen im Ökosystem.

155 Funktionale Kleptoplastie in Meeresnacktschnecken

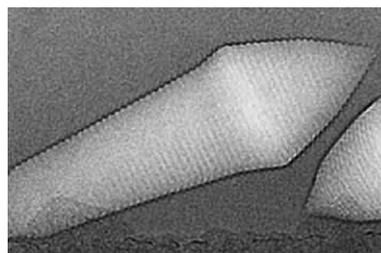
Eine besondere Art der Symbiose mit einem Photosynthese betreibenden Organismus findet sich bei den Meeresnacktschnecken. Wie die Schnecken es schaffen, Chloroplasten aus ihren Nahrungsalgen aufzunehmen und aktiv zu halten, lesen Sie in unserem Beitrag.



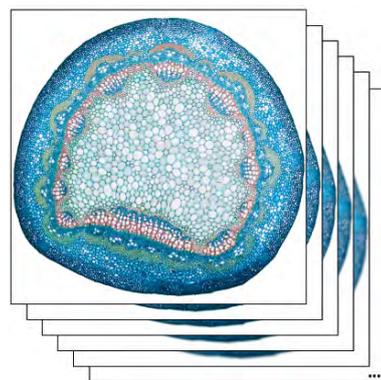
Copyright: Elise M. J. Laetz (Universität Groningen).

148 Gasvesikel und ihr Einsatz in der Biomedizin

Einige Mikroorganismen nutzen Gasvesikel als Schwebhilfe. In der Biomedizin kommen diese zur Herstellung von Impfstoffen und bei Ultraschalluntersuchungen als neuartiges Kontrastmittel zum Einsatz.



164 Virtuelle digitale Lichtmikroskopie in der Lehre



Lichtmikroskopische Untersuchungen gehören zu den Basiselementen der schulischen und universitären Ausbildung in den Lebenswissenschaften. Mit UDE BioSLIDES stellen wir ein System für ihre realitätsnahe Nachbildung in Form virtueller digitaler Mikroskopie vor.

172 Vom biologischen Vorbild zum 3D-Universum

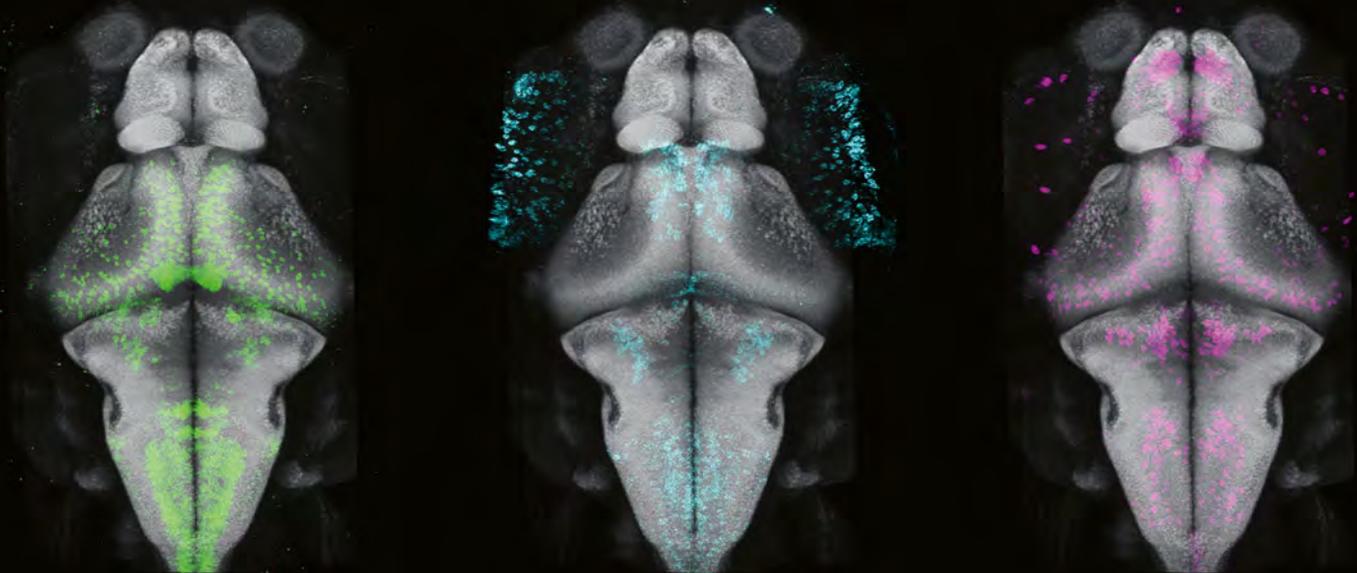
Anschauungsobjekte tragen maßgeblich zum Verständnis der komplexen Welt des Lebendigen bei. Ihre Herstellung mittels 3D-Druck eröffnet vollkommen neue Möglichkeiten von der Erfassung der Biodiversität bis hin zur Produktion von Prothesen oder Organen.



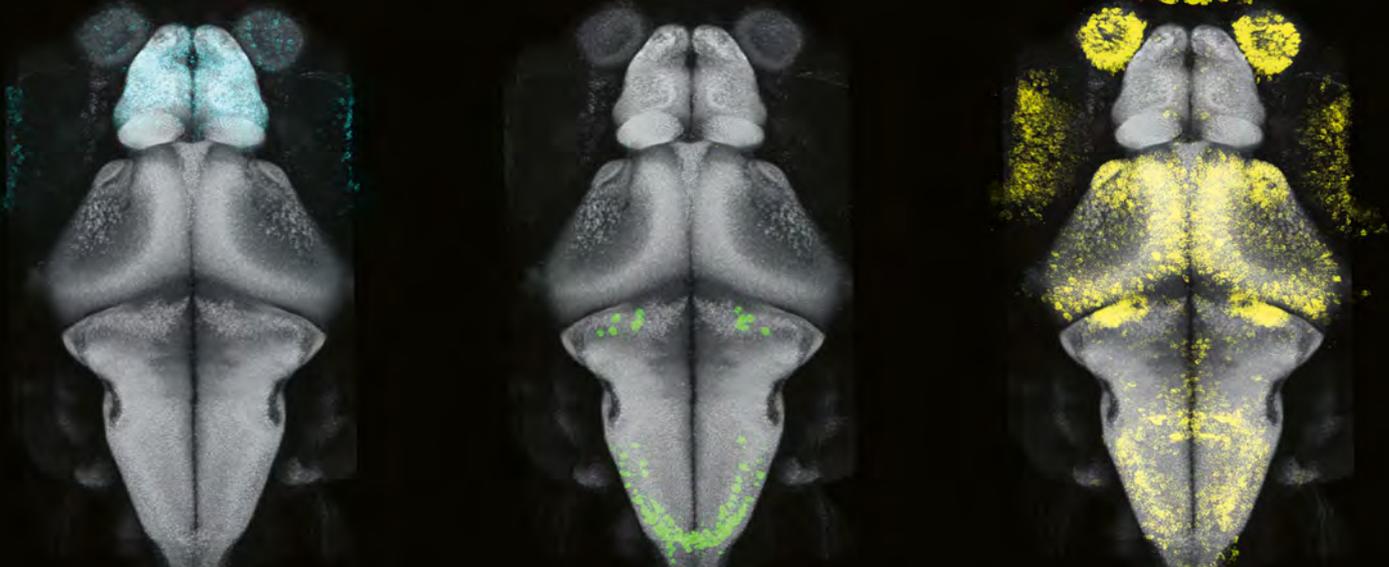
180 Draußenschulbewegung in Deutschland

Zurzeit formiert sich eine Graswurzelbewegung, die den Horizont der Schule sprichwörtlich erweitern möchte. Dabei reicht das Spektrum des Draußenlernens von weitgehend freien Aktivitäten in der Natur bis hin zu bildungsplanorientierten und fachzentrierten Aktivitäten.





Diese Abbildung zeigt einige der Genexpressionskarten, die jetzt in den Max-Planck-Zebrafisch-Gehirn-Atlas (mapzebrain) aufgenommen wurden. Die Forscher kartierten die Genexpression einzelner Zellen im gesamten Zebrafischgehirn mit hoher Auflösung.
Foto: Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz / Inbal Shainer, Enrico Kuehn.



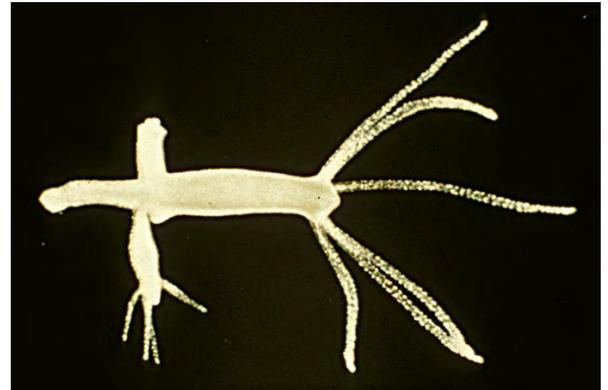
FORSCHUNG & ENTWICKLUNG

Ein komplexes Netzwerk aus Nervenzellen ermöglicht es Zebrafischen, ihre Umgebung wahrzunehmen, Nahrung oder Artgenossen für die Paarung zu finden oder Feinden zu entkommen. Neuronen mit ähnlichen Eigenschaften werden zu Nervenzelltypen zusammengefasst, von denen es im Fischgehirn hunderte, wenn nicht sogar tausende, gibt. Karten, die die Genexpression im Gehirn abbilden, können helfen, die Funktionsweise des Gehirns besser zu verstehen. Die bislang vorhandenen Karten weisen allerdings noch viele weiße Bereiche auf. Um diese mit Informationen zu füllen, verwendete ein Team um Inbal Shainer und Enrico Kuehn aus der Arbeitsgruppe von Herwig Baier am Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz ein Verfahren, das die Expression einzelner Gene unter dem Mikroskop in zellulärer Auflösung sichtbar macht. Aus den gewonnenen Daten erstellte das Team für jedes der untersuchten Gene eine Expressionskarte und kombinierte hunderte dieser Karten dann zu einem Atlas. Dieser neue Genexpressionsatlas fügt sich nahtlos in den zuvor entwickelten 'Max-Planck-Zebrafisch-Gehirn-atlas' (mapzebrain) ein, der Informationen zu Gehirnstrukturen, Zelltypen und den Verbindungen zwischen Zellen enthält. Aus der Kombination dieser Merkmale und der Genexpression können sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nun ein **vollständigeres Bild davon machen, wie das Gehirn des Zebrafisches Informationen verarbeitet.** Der Zebrafisch-Atlas ist ein kostenloses Online-Tool und wird von der Forschungscommunity laufend mit neuen Datensätzen erweitert. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler können die Karten online einsehen und analysieren, sie auf ihre Geräte herunterladen oder den Atlas mit Auswertungsprogrammen verbinden. www.bi.mpg.de/de

Eine *Hydra* aus dem Piburger See in Tirol könnte neue Erkenntnisse über diese Tiere mit der außergewöhnlichen Regenerationsfähigkeit liefern. Die Arbeitsgruppe von Bert Hobmayer am Institut für Zoologie der Universität Innsbruck konnte nun die gesamte Erbinformation von *Hydra oligactis* mithilfe der neuesten DNA-Sequenzierungstechnologie, dem *Oxford Nanopore Sequencing*, bestimmen und analysieren. Dies war die letzte Hydren-Art, deren Genom bisher noch nicht vollständig bekannt war. Die Ergebnisse sind deswegen so interessant, **weil *Hydra oligactis*, im Gegensatz zu allen anderen Hydren-Arten, Tumore ausbilden und sterben kann.**

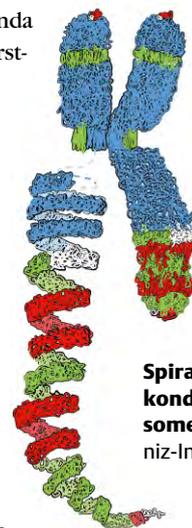
„Nun, da wir das Genom von *Hydra oligactis* genau kennen, können wir viel präziser untersuchen, welchen Beitrag einzelne Gene zum stressinduzierten zellulären Altern in diesen Tieren leisten“, erzählt Bert Hobmayer. „Diese molekularen Prozesse können wir dann vergleichend in anderen Arten untersuchen, deren Zellen nicht altern und die nicht sterben.“ Die Arbeit der Innsbrucker Forscher/-innen war Teil eines internationalen Projektes unter der Leitung von Celina Juliano an der *University of California* in Davis, dessen Ergebnisse letzte Woche als Cover-Story im Fachjournal *Genome Research* veröffentlicht wurden. Ein internationales Team hat darin zum ersten Mal in umfassender Weise die Prinzipien der Genregulation in Hydren untersucht. www.uni-innsbruck.de

■ In früheren Studien wurde angenommen, dass sich die Chromatiden der Metaphase-Chromosomen zu einer Spirale aufrollen, dem Chromonema. Nun hat ein internationales Forschungsteam unter der Leitung des IPK Leibniz-Instituts und des Instituts für Experimentelle Botanik der Tschechischen Akademie der Wissenschaften erstmals diesen direkten Nachweis erbracht. „Die gewundene Chromatidenorganisation und ihre Organisationseinheit,



Eine knospende *Hydra* unter dem Mikroskop. Foto: Bert Hobmayer.

das Chromonema, wurden unabhängig voneinander mit verschiedenen Methoden bestätigt“, sagt Dr. Veit Schubert von der IPK-Forschungsgruppe „Chromosomenstruktur und -funktion“. Dazu gehörten die Chromosomen-Konformationserfassung (Hi-C) an isolierten mitotischen Chromosomen, die Polymermodellierung sowie die Analyse von Schwesterchromatid-Austauschen und Oligo-FISH-markierten Regionen mit Hilfe der super-auflösenden Mikroskopie. „Um die übergeordnete Struktur mitotischer Chromosomen zu untersuchen, wurden die großen Chromosomen der Kulturgerste als Modell verwendet. Eine einzige helikale Windung umfasst 20 bis 38 Megabasen DNA und bildet eine ~400 nm dicke Faser, die wir als Chromonema bezeichnen“, sagt Dr. Amanda Camara, eine der Erstautorinnen der Studie. Das Modell schlägt einen allgemeinen Mechanismus für die Bildung kondensierter mitotischer Chromosomen vor, der auf alle Eukaryoten mit einem breiten Spektrum von Genomgrößen anwendbar ist. „Wir erwarten, dass nach



Spiralförmige Struktur kondensierter Chromosomen. Grafik: IPK Leibniz-Institut.

unserer Studie die Chromonema-basierte Organisation von Chromosomen in einer größeren Anzahl von Pflanzen- und Tierarten mit großen Chromosomen bestätigt wird. Die Identifizierung des Prinzips der Chromosomenkondensation in dieser Arbeit ist die Voraussetzung zum Verständnis der Chromatindynamik im Verlauf des Zellzyklus“, sagt Dr. Amanda Camara.

www.ipk-gatersleben.de

■ Acht Arme und eine Tarnkappenhaut – Kraken erscheinen uns aufregend fremdartig, ihre kognitiven Fähigkeiten faszinieren uns, weil sie mit denen von Wirbeltieren vergleichbar sind. Dabei haben sich unsere Entwicklungslinien vor etwa 550 Millionen Jahren getrennt. Die Kombination von Intelligenz und Fremdartigkeit veranlasste Neurowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler bereits vor 150 Jahren, das Gehirn von Oktopoden zu studieren. Einem internationalen Team mit Beteiligung der Universität Göttin-

gen sind nun **die ersten Hirnstrommessungen in freischwimmenden Kraken gelungen**. Dazu nutzten die Forschenden miniaturisierte Datenlogger, die ursprünglich für Vögel entwickelt wurden. Sie wurden abgedichtet und so implantiert, dass die Kraken frei durch ihr Aquarium schwimmen konnten. Dadurch konnten Hirnströme und Verhalten synchron aufgezeichnet werden. Die elektrischen Messungen erfolgten in Hirnregionen, die vermutlich für Lernen und Gedächtnis verantwortlich sind. Deren geschichteter Aufbau erinnert an den Hippocampus, der im Säugetierhirn diese Aufgaben übernimmt und sich dabei verschiedener Aktivitätsmuster bedient. Eins dieser Muster sind langsame Spannungsauslässe mit überlagerten hochfrequenten Schwingungen, sogenannte *sharp waves with ripples*. „Im Kraken beobachteten wir zwar Ausschläge, die in Größe und Zeitverlauf den *sharp waves* ähneln, allerdings ohne die *ripples*“, erläutert Dr. An-

dreas Neef vom Göttingen Campus Institut für Dynamik Biologischer Netzwerke, der die Messungen auswertete. Ob die Ähnlichkeit der Aktivitätsmuster auf eine vergleichbare Rolle für die Gedächtnisbildung hinweist, ist noch offen. Ebenso unklar ist die Funktion von langsamen, viele Sekunden andauernden Schwingungen im Krakenhirn, die keinem bekannten Aktivitätsmuster ähneln und die in weiteren Studien untersucht werden sollen.

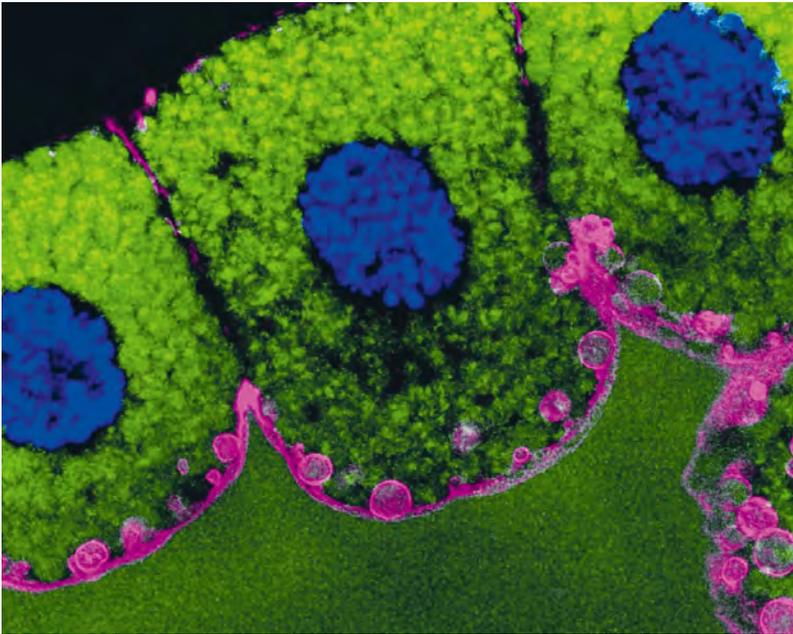
www.uni-goettingen.de

■ Das Protein EFhD2/Swip-1 trägt bei Fruchtfliegen zur kontrollierten Absonderung von Sekreten bei und könnte beim Menschen an Fehlfunktionen von Nervenverknüpfungen beteiligt sein. Das hat eine Arbeitsgruppe aus der Marburger Hochschulmedizin herausgefunden, indem sie Experimente an Drüsenzellen von Fruchtfliegen durchführte. „Zellen nutzen den strikt geregelten Prozess der Exozytose, um Moleküle aus dem Zellinneren nach außen zu schleusen“, erklärt der Marburger Physiologieprofessor Dr. Sven Bogdan. Die Zellen verpacken dabei Moleküle in membranumhüllten Vesikeln, die anschließend mit der Außenhülle der Zelle verschmelzen, wobei der Inhalt in die Umgebung gelangt. Der gesamte Vorgang – die Herstellung der Vesikel, ihr Transport durch die Zelle, die Verschmelzung mit der Außenhülle samt Absonderung des Vesikelinhalts – beruht auf den Bewegungen des Zellskeletts, das aus Fäden des Moleküls Aktin besteht. Bogdan und seine Mitarbeiterin Dr. Franziska Lehne erforschten den Prozess an Speicheldrüsenzellen der Fruchtfliege *Drosophila*. Insbesondere untersuchte das Forschungsteam das Protein EFhD2/Swip-1, von dem man weiß, dass es an Aktin bindet. „Das Protein ist an verschiedenen zellulären Prozessen beteiligt, so an der Wanderung von Zellen, an der Krebsausbreitung und am Wundverschluss der Haut“, legt Koautorin Franziska Lehne dar. Das Team stellte fest, dass EFhD2/



Acht Arme und eine Tarnkappenhaut – Kraken erscheinen uns aufregend fremdartig, ihre kognitiven Fähigkeiten faszinieren uns, weil sie mit denen von Wirbeltieren vergleichbar sind.

Foto: Tamar Gutnick, Michael Kuba.



Das mikroskopische Bild einer Speicheldrüse zeigt in grün drei sekretorische Zellen mit ihren blau gefärbten Zellkernen. Die violette Färbung kennzeichnet das Protein EFhD2/Swip-1 von sekretorischen Vesikeln. Foto: Dr. Franziska Lehne

Swip-1 vermehrt in Drüsenzellen von *Drosophila* vorkommt und dort zusammen mit Aktin auftritt, wenn sich Vesikel bilden. „EFhD2/Swip-1 wird nicht für die Vereinigung von Vesikeln zu größeren Bläschen benötigt, sondern eher für die Zusammenziehung der Vesikelhülle, wodurch der Inhalt freigesetzt wird“, führt Lehne aus. „Die Befunde sind auch deswegen von Belang, weil das Pendant von EFhD2/Swip-1 beim Menschen eine Reihe von krankhaften Störungen begleitet“, ergänzt Bogdan. „Das Protein gilt daher als möglicher Biomarker für chronische Krankheiten; das betrifft zum Beispiel Fehlfunktionen von Nervenverbindungen, die ihre chemische Kommunikation ja auch mithilfe von Vesikeln bewerkstelligen.“

www.uni-marburg.de

STANDORTE

Die Heinz Nixdorf Stiftung stellt der Technischen Universität München (TUM) über 3,8 Mio. Euro zur Erforschung von organoiden Modellsyste-

men zur Verfügung. Das Geld wird in eine Stiftungsprofessur für KI-unterstützte Organoid-Entwicklung und in ein hochspezialisiertes „Heinz Nixdorf Labor für Organoid-system-Analytik“ fließen. Organoide sind außerhalb des Körpers im Labor erzeugte Mini-Organen, die unter

Zellkulturbedingungen wachsen können. So können aus Stamm- oder Patientenzellen organ- und erkrankungsspezifische Organoide generiert werden. Somit ergibt sich ein direkter Zugang zu den komplexen Prozessen der Organentwicklung und krankheitsbedingter Fehlentwicklungen. Dies ist besonders für Wirkstofftests interessant und **eröffnet die Möglichkeit, patientenspezifische Therapien zu entwickeln**. Zudem hat die Organoid-Technologie das Potenzial, Tierversuche langfristig zu reduzieren.

Die Heinz Nixdorf Professur für KI-unterstützte Organoid-Entwicklung soll insbesondere die Gewinnung und integrative Analyse der Datensätze aus zellulären Mikrosystemen bzw. Organoiden erforschen. Das „Heinz Nixdorf Labor für Organoidsystem-Analytik“ wird die vollautomatisierte Generierung von Organoid-, Genomics- und Proteomics-Analysen ermöglichen. Das Labor und die Professur werden künftig im gerade im Bau befindlichen Gebäude des neu gegründeten *Centers of Organoid Systems* beherbergt.

<https://www.bioengineering.tum.de>



Partnerschaft für medizinischen Fortschritt (v. l.): TUM-Präsident Prof. Thomas F. Hofmann, Dr. Horst Nasko, stellvertretender Vorstandsvorsitzender der Heinz Nixdorf Stiftung, Prof. Matthias Hebrok, Dr. Sandra Bogdanovic, TUM-Fundraising, Prof. Andreas Bausch. Foto: Ulrich Meyer / TUM.

LEBENDIGER SEE DES JAHRES 2023

Der *Global Nature Fund* (GNF) und das Netzwerk Lebendige Seen Deutschland (NLSD) verleihen dem Geiseltalsee in Sachsen-Anhalt diese Auszeichnung als Anerkennung für die **herausragenden Leistungen bei der Wiederherstellung der Natur und der Schaffung einer artenreichen Umgebung** am und im See: Innerhalb von nur 30 Jahren hat sich dieser von einer lebensfeindlichen Grube inmitten einer kahlen Bergbaulandschaft zu einem natürlichen Kleinod mit einer einzigartigen Pflanzen- und Tierwelt entwickelt.

Der Geiseltalsee hat eine Fläche von 1.840 Hektar, ist bis zu 76 Meter tief, besitzt ein Wasservolumen von 423 Millionen Kubikmetern und ist heute der größte künstliche See Deutschlands. In den drei Jahrzehnten seit Ende des Tagebaus hat das oligotrophe, also nährstoffarme Ökosystem des Sees eine außergewöhnliche Pflanzen- und Tierwelt entwickelt, die an die besonderen Bedingungen angepasst ist: Es beherbergt 11 verschiedene Armleuchteralgen, deren Bestände aufgrund der Klarheit des Wassers bis 13 Meter Tiefe reichen. Diverse Wasserinsekten und Fischarten können

beobachtet werden, zudem 240 Vogelspezies, davon 108 Brutvogelarten und zahlreiche Durchzügler und Wintergäste. Tundra-saatgans, Kolbenente, Bienenfresser und Flussseeschwalbe sind nur einige der schützenswerten Vögel, die hier einen neuen Lebensraum gefunden haben. Der Wechsel zwischen Kippenwäldern, Lösssteilwänden, Gebüschern, Grünländern und Brachen, Rohböden und Röhrichten schafft einmalige Bedingungen für Pflanzen und Vögel in der neu entstandenen Bergbaufolgelandschaft. www.globalnature.org/de/living-lakes/lebendiger-see-2023



Herbststimmung am Geiseltalsee, dem „Lebendigen See des Jahres 2023“. Foto: Heiko Günzel.

AUSSTELLUNGEN

Was verraten unsere Gene über uns? Wie viel von uns steckt in unserer DNA? Was passiert, wenn wir unser Erbgut verändern? Die Ausstellung **„Von Genen und Menschen“ im Deutschen Hygiene-Museum Dresden** hinterfragt noch bis zum 10. September 2023 die aktuellen Erkenntnisse der Genforschung aus der Perspektive der Sozial- und Kulturwissenschaften: mit Objekten aus Alltag und Wissenschaft, Kultur und Geschichte, mit Positionen der zeitgenössischen Kunst – und mit Stationen, die dazu einladen selbst herauszufinden, wer wir sind und werden könnten.

Um das Jahr 2000 sah es so aus, als würde das Geheimnis des Lebens langsam gelüftet: Die Entschlüsselung des menschlichen Erbguts durch das Humangenomprojekt schien nur noch eine Frage der Zeit; das Schaf Dolly war erfolgreich geklont. Für die einen rückte damit die Bekämpfung bislang unheilbarer Krankheiten in greifbare Nähe, andere sahen bedrohliche Science-Fiction-Szenarien

Wirklichkeit werden. Hat sich seither etwas an dieser Konstellation verändert?

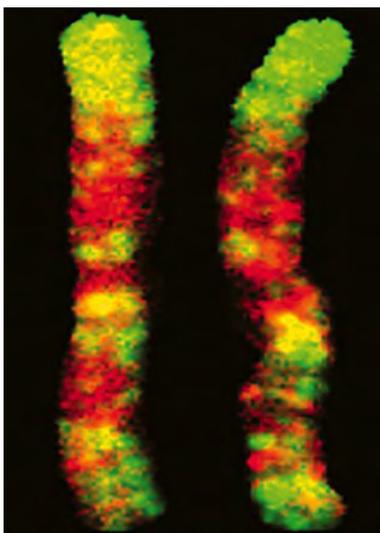
Die Genforschung hat in den letzten Jahrzehnten neues Wissen und faszinierende Technologien hervorgebracht – von der Sequenzierung des Neandertalergenoms über die Genschere CRISPR-Cas9 bis hin zu modernen mRNA-Impfstoffen. Auch wenn sich nicht alle Zukunftserwartungen erfüllt haben, sind diese Fortschritte doch im Begriff, unser Verständnis von Herkunft, Identität und Gesundheit zu verschieben. Und sie beeinflussen die Stellung des Menschen in der Natur. Die Ausstellung hinterfragt: Wie kritisch müssen wir mit diesen Errungenschaften und ihren möglichen Konsequenzen umgehen? Ist das technisch Machbare auch das ethisch Vertretbare? Und: Ist die Gefahr einer rassistischen Instrumentalisierung der Genetik für immer gebannt?

www.dbmd.de

■ Menschen und Schweine leben bereits seit Jahrtausenden miteinander. Seitdem haben sich die Tiere

enorm verändert. Heutige Hausschweine sind viel größer und schwerer als ihre Vorfahren, die Wildschweine. Sie haben mehr Fleisch, weniger Fett und sie erscheinen oft rosa, weil sie fast kein Fell mehr haben. Wie es dazu kam, zeigt bis zum 27. August 2023 die **neue Sonderausstellung im Naturkundemuseum Potsdam „SUS100 – Mensch verändert Schwein“**. Die Ausstellung zur Schweinezucht der letzten 100 Jahre ist eine Leihgabe des Zentralmagazins Naturwissenschaftlicher Sammlungen der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Museumsgäste können beeindruckende Präparate von modernen Zuchtschweinen und historischen Ferkeln sowie Fotos zur Entwicklung von Edel- und Landschweinen anschauen. Außerdem gibt es ein Spiel, in dem Schweine gezüchtet werden und eine Umfrage über den eigenen Fleischkonsum. Kinder entdecken die Ausstellung mit dem Ferkel Susi, das auf den Tafeln zu finden ist.

www.naturkundemuseum-potsdam.de



Die abgebildeten Chromosomen eineiiger Zwillinge weisen Unterschiede auf, die darauf hindeuten, das Alter und Umwelt die menschliche Gesundheit beeinflussen könnten. Abb.: (2005) National Academy of Sciences, U.S.A.



Einblick in die Ausstellung „SUS100 – Mensch verändert Schwein“.
Foto: NKMP/D.



Die Generalversammlung der IUBS hat VBIO-Präsident Karl-Josef Dietz zum Präsidenten gewählt. Er folgt auf L. S. Shashidara aus Indien und wird bis zur nächsten Wahl im Jahr 2026 dem Exekutivkomitee der IUBS vorstehen. In dieser Zeit möchte Dietz „die biologischen Belange auf der internationalen Ebene des Internationalen Wissenschaftsrats bis hin zu den UN-Gremien unter enger Einbeziehung und Vernetzung der nationalen Akteure vertreten.“

BiuZ gratuliert herzlich und wünscht viel Erfolg in der dreijährigen Amtszeit!

INTERNATIONAL UNION OF BIOLOGICAL SCIENCES

IUBS – die Vertretung der Biologie auf internationaler Ebene

Bereits 1919 wurde die Internationale Union der Biowissenschaften (International Union of Biological Sciences, IUBS) mit dem Ziel gegründet, der Biologie weltweit den ihr gebührenden Raum zu geben und als Sprachrohr für die nationalen Mitglieder und die internationalen wissenschaftlichen Fachgesellschaften zu dienen. Dieser Tradition treu bleibend haben sich die Ziele der IUBS heute erweitert, dazu gehören insbesondere (1) die transnationale Förderung der biologischen Forschung, die Bereitstellung einer Plattform zum wissenschaftlichen Austausch und die globale Koordination biologischer Informationen, (2) die globale Unterstützung biologischer Bildung und Karriereentwicklung in Forschung und anderen Bioberufen, (3) der Ausbau der internationalen Netzwerkbildung unter Biolog/-innen und die Vertretung der Biologie in den internationalen Gremien und Organisationen, sowie (4) die biowissenschaftliche Diplomatie in internationaler Politik und Gesellschaft. Ein Beispiel ist der Einsatz der IUBS für die Erforschung, den Erhalt und die faire Nutzung von Biodiversität auch im Rahmen der Biodiversitätskonvention (CBD) und für eine integrierende Biologie nach dem Motto *Unifying Biology der IUBS*.

Wie spiegeln sich diese Ziele in den aktuellen konkreten Aktivitäten der IUBS wider? Vom 9. bis 12. März 2023 fand in Tokyo die 34. Vollversammlung (*General Assembly*, GA34) der IUBS statt (Abbildung 1, [1]). Die GA34 legte die Aktivitäten der IUBS für die kommenden drei Jahre fest und wählte das neue *Executive Committee* für das kommende Triennium (siehe Kasten „Managementstrukturen der IUBS“). Unter den eingereichten Wissenschaftsprojekten wurden vier ausgewählt, die im kommenden Triennium vorangetrieben werden

sollen. Das Projekt *Open Biodiversity and Health Big Data* (BDHD) strebt an, die großen Datenmengen der Biodiversitäts- und Gesundheitsforschung strukturiert im *Open Access*-Format bereitzustellen. Mechanismen des Zusammenwirkens und des Informationsaustauschs in biologischen Systemen werden für Lehrveranstaltungen der formalen Bildung im Projekt *Grand Challenge: Education on Chemical Ecology in the Anthropocene* aufgearbeitet. Die Bedeutung der weltweit verbreiteten Weidewirtschaft

für den Erhalt der Biodiversität und für die regionale Sozioökonomie wird im Projekt *Pastoralism as a Global Herbivory Socio-Ecosystem* aufgegriffen und die aktuellen Herausforderungen der von Tieren auf den Menschen übertragenen Krankheiten beschäftigen das *Zoonotic Disease Coordination Network* in den kommenden drei Jahren. Die IUBS stellt für diese Vorhaben *Seed Funding* bereit, um nach ein- bis dreimaliger Förderung zu eigenständigen Forschungsvorhaben zu werden.

Die Erfolgsgeschichte der IUBS

Zum Zeitpunkt der Gründung der IUBS 1919 wurde die Biologie bereits als eine naturwissenschaftliche Disziplin betrachtet, allerdings waren die genutzten Fachsprachen und die systematische Nomenklatur uneinheitlich und fragmentiert. Die IUBS gründete das Internationale Komitee für Bionomenklatur und unterstützte von Anfang an die Internationale Kommission für Zoologische Nomenklatur. Inzwischen befassen sich darüber hinaus zahlreiche Mitgliedsfachgesellschaften der IUBS mit der Systematik weiterer Organismengruppen wie Pflanzen, Kulturpflanzen oder Pilze, mit der Standardisierung von Biodiversitätsinformationen und der phylogenetischen Nomenklatur. Die IUBS beteiligt sich an Prozessen zur Vereinheitlichung der Nomenklatur. Diese scheinbar spröde Aufgabe ist für die Biologie als Wissenschaft von fundamentaler Bedeutung.

Mit der fachlichen Entwicklung der Biologie entstanden in den darauffolgenden Jahrzehnten vermehrt (Teil-)Disziplinen und weitere internationale Unionen. So folgte der Vereinheitlichung der Fachsprache und Nomenklatur eine erneute Fragmentierung in Disziplinen wie in keiner anderen Wissenschaft. Aus Arbeitsgruppen der IUBS formierten sich die Internationale Union der mikrobiologischen Gesellschaften (IUMS), die Internationale Union für Biochemie und Molekularbiologie



ABB. 1 Logo der GA34 der IUBS, Tagungspräsident Prof. Harufumi Nishida.

MANAGEMENTSTRUKTUREN DER IUBS

Exekutivkomitee 2023–2026

Präsident	Karl-Josef Dietz (Germany)
Vizepräsident	Le Kang (China)
Generalsekretärin	Renée Borges (Indien)
Schatzmeister	Moemen Hanafy (Ägypten)
+ 5 weitere Mitglieder	
Ehem. Präsident	LS Shashidara (Indien)

Executive Director der IUBS

Nathalie Fomproix (Frankreich)
Bât 442, Université Paris Sud 11 91405
Orsay cedex, France
E-mail: nfomproix@iubs.org

(IUBMB), die Internationale Union physiologischer Wissenschaften (IUPS) und selbst die Internationale Union psychologischer Wissenschaften (IUPsyS) entwickelte sich aus einer Division der Zoologie innerhalb der IUBS. Die Internationalen Unionen vertreten ihre Wissenschaftsgebiete in den globalen Organisationen. Sie agieren unabhängig und sind zusätzlich in dem *International Science Council* (ISC) vertreten (Abbildung 2). Darüber hinaus sind insbesondere die UNESCO und die Vereinten Nationen zu nennen, aber eben auch die UN-Biodiversitätskonvention (CBD) oder das Rahmenübereinkommen der UN über Klimaänderungen (UNFCCC).

Die globale Position einer integrierenden Biologie

Die Ausweitung der Biologie und die Entstehung der Disziplinen führten zu einer exponentiellen Vergrößerung der biologischen Community. Die wechselseitige Interaktion mit der Chemie, Physik, Mathematik, Geowissenschaften, Technikwissenschaften und Informatik wurde dabei stets enger und notwendiger, um innovativen Erkenntnisfortschritt zu erzielen. Diese Entwicklung änderte die Art und Weise der Förderung: Projekte konzentrierten sich meist auf das kurzfristige Erreichen von Ergebnissen (*Deliverables*) in stark reduktionistischen Ansätzen. Die disziplinäre Fragmentierung der Biologie und eingeschränkte Methodik verhinderten holistische Ansätze zum Begreifen biologischer Phänomene. Trotzdem oder gerade deshalb waren die Erkenntnisgewinne von fundamentaler und weitreichender Bedeutung und es gelangen wesentliche Verbesserungen der Ernährungssicherheit, der Nahrungsqualität, der weltweiten Gesundheit und der nachhaltigeren Bewirtschaftung der Erde. Allerdings berücksichtigten diese Fortschritte kaum das gesamte System Erde und führten zu Ressourcenübernutzung. Auch der Nord-Süd-Ausgleich gelang nicht.

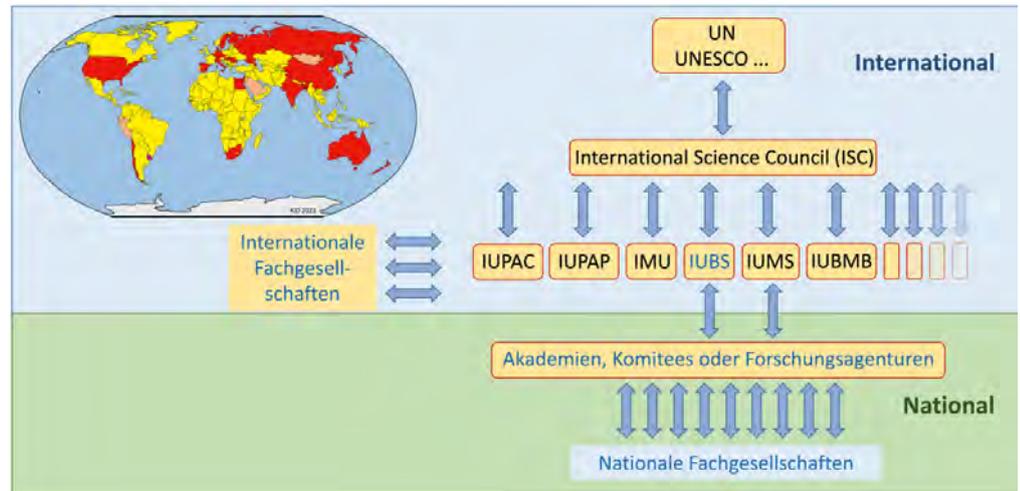


ABB. 2 Die IUBS vertritt die Biologie auf internationaler Ebene und stellt die Verbindung zu den nationalen Mitgliedern und internationalen Fachgesellschaften her. Rote Einfärbung auf der Weltkarte zeigt die Mitglieder der IUBS. IUPAC: *International Union of Pure and Applied Chemistry* (1919), IUPAP: *International Union of Pure and Applied Physics* (1922), IMU: *International Mathematical Union* (1920), IUMS: *International Union of Microbiological Societies* (1927), IUBMB: *International Union of Biochemistry and Molecular Biology* (1955).

IUBS als Protagonist einer integrierenden Biologie im 21. Jahrhundert

Bahnbrechende methodische und inhaltliche Fortschritte erlaubten in den vergangenen 20 Jahren zunehmend Gen-Organismus-Umwelt-Interaktionen zu begreifen. Die Erzeugung, Auswertung, Interpretation und Integration großer Datensätze aus Genomik, Proteomik, Metabolomik, Phänomik und Ökologie ermöglichen globale Analysen jenseits des spezifischen molekularen Mechanismus und erweitern die Randbedingungen zur innovativen Hypothesenbildung. Ansätze der *Computational Biology*, Bioinformatik und künstlichen Intelligenz identifizieren globale Korrelate, erzeugen prädikative Modelle und erstellen multidimensionale Vorschläge für Kausalitäten. Diese methodischen und konzeptionellen Entwicklungen rücken wieder den Gedanken einer integrierenden Biologiebetrachtung (*Unifying Biology*) ins Zentrum und stärken die Bedeutung der IUBS.

Die Notwendigkeit zur integrierenden Biologie wird offensichtlich in Anbetracht der Herausforderungen von Klimawandel, Biodiver-

sitätsverlust, Urbanisierung, Entwaldung und dem Gebot der Nachhaltigkeit; Biodiversitäts- und Umweltforschung rücken Evolution, Bio-Nomenklatur und Taxonomie [3] aus der eher vernachlässigten Ecke zurück auf den gebührenden zentralen Platz. Dies sind Fachgebiete, die vor allem von der IUBS gefördert wurden, und hierzulande an Universitäten wieder gestärkt werden müssen.

So fällt der IUBS innerhalb des Bio-Clusters im ISC eine führende Rolle zu. Die IUBS leitet das *Science Forum* zur Biodiversität im Rahmen

UNTERSTÜTZUNGSFORMATE DER IUBS IN ALLER KÜRZE

- Förderung transnationaler wissenschaftlicher Programme und Netzwerke
- Partnerschaftliche Projekte wie Science Forum, IYBSSD [4], Gender Equality in Science
- Bildungsprogramme, z. B. Climate Change Education, Experiments for Rural Schools
- Förderung zur Tagungsteilnahme für Studierende, junge Wissenschaftler/-innen und Postdocs
- Unterstützung von Konferenzen

von UNFCCC und CBD, setzt sich international für wissenschaftsgeleitete politische Entscheidungen ein, definiert Leitlinien zum Arten- und Biotopschutz, propagiert offene Wissenschaft (*Open Science, Open Access*) und streitet für fairen, transparenten und einfachen Zugang und Vorteilsausgleich bei biologischen Ressourcen für die Forschung (*Access and Benefit Sharing, ABS*). Die Rahmenbedingungen für Grundlagenforschung müssen dem Primat minimaler Einschränkungen und maximaler Unterstützung und Ermöglichung gehorchen. Dies gilt auch für ABS und Nutzung genetischer Ressourcen.

Hierzulande stellt das Deutsche National-Komitee (DNK) der IUBS und IUMS die Verbindung zwischen den nationalen wissenschaftlichen Fachgesellschaften und der IUBS her. Das neue *Executive Committee* der IUBS hat als eines der prioritären Ziele für das kommende Triennium vorgesehen, den Informationsfluss über die Aktivitäten der IUBS zu den nationalen Mitgliedern effizienter zu gestalten (siehe hierzu auch Kasten „Unterstützungsformate der IUBS in aller Kürze“).

Danksagung

L. S. Shashidhara (National Centre for Biological Sciences, Bengaluru, India) und

Nathalie Fomproix (IUBS, Paris) stellten englischsprachige Informationen und Textbausteine zur Verfügung.

Literatur

- [1] GA34 auf <https://iubs34th-ga.r.chuo-u.ac.jp>
- [2] IUBS auf <http://www.iubs.org>
- [3] M. S. Engel et al. (2021) The taxonomic impediment: a shortage of taxonomists, not the lack of technical approaches. *Zoological Journal of the Linnean Society* 193, 381–387.
- [4] K.-J. Dietz (2022) Grundlagenforschung für nachhaltige Entwicklung: Das IYBSSD. *Biologie in unserer Zeit* 52, 311–313.

Karl-Josef Dietz,
Universität Bielefeld

DOI:10.11576/biuz6425

VORTRAGSREIHE

Faszination Biologie – eine Reihe mit Vorträgen aus der Wissenschaft

Die Biologie umfasst ein unglaublich vielfältiges Spektrum an Themen. Dazu zeigt sie auf allen Forschungsgebieten eine Dynamik, die eine Herausforderung für jeden Biologie-Lehrplan und eine Herausforderung für jede Form der Wissenschaftskommunikation ist. Der VBIO initiierte dieses Angebot einer Vortragsreihe „Faszination Biologie“, um biologische Sachkompetenz direkt über Wissenschaftler/-innen mit ihrer Expertise erfahrbar zu machen und die eigene vertiefen zu können.

„Bücher sind zu langsam“, so beantwortete Prof. Stephan Clemens (Pflanzenphysiologie, Universität Bayreuth) die Frage nach einer guten Quelle zu seinem Thema „Von Genomen zur Genomeditierung: Techniken, Anwendungen und Potentiale bei Pflanzen“ (siehe unten). Damit brachte er die Problematik

der zeitnahen Kommunikation von wissenschaftlichen Forschungsergebnissen an die breite Öffentlichkeit auf den Punkt. Wie oft werden sich vor allem Lehrkräfte diese Frage stellen, wenn sie ihren Unterricht vorbereiten und sich fragen, ob dies der aktuellste Stand wissenschaftlicher Forschungsergebnisse ist. An biologischen Themen Interessierten wird es ähnlich ergehen.

Auslöser dieser Reihe waren die neuen Bildungsstandards (BiStas) im Fach Biologie für die Allgemeine Hochschulreife (18.06.2020, KMK) und die damit notwendige Entwicklung neuer Lehr- bzw. Bildungspläne (Kernlehrpläne) in allen Bundesländern. Die BiStas dienen deshalb – aber nicht nur – als Orientierung für die Themenfindung für diese Reihe, legen sie doch die bundesweit gel-

tenden Standards fest, die eine vergleichbare biologische Bildung ausmachen sollen. Bildungsstandards entstehen jedoch immer in einer bestimmten Zeitperiode biologischer Forschung, sie müssen eine Prognose für etliche Jahre in die Zukunft treffen und werden nach vielen Rückmeldeschleifen und Anhörungen unterschiedlichster Akteure im Bildungsbereich schließlich in Kraft gesetzt. Derweil geht biologische Forschung weiter ...

Vor diesem Hintergrund entwickelte Marga Radermacher (Sprecherin der Landesverbände) zusammen mit weiteren Präsidiumsmitgliedern und den Geschäftsstellen diese neue Reihe, um insbesondere Lehrkräfte zu adressieren. Letztere sind entscheidende Vermittler/-innen biologisch relevanter Inhalte und Kompetenzen. Darüber hinaus sollen weitere Biologieinteressierte angesprochen werden, da die Biologie in ihrer Rolle als Leitwissenschaft mit anderen Wissenschaften dazu beiträgt, aktuelle und zukünftige wissenschaftliche, globale wie lokale ökologische, ökonomische und soziale Probleme zu bewältigen. Diese Reihe will informieren und zugleich begeistern und damit einen wichtigen Beitrag zu einer biologisch-naturwissenschaftlichen Grundbildung (*Scientific Literacy*) leisten (siehe Editorial dieses Heftes).

ABB. 1 Mikrobewachstum auf Nährboden in einer Petrischale. Foto: Felicitas Pfeifer.



Format und Inhalte der Veranstaltungen

Die Veranstaltungen finden als moderierte Webinare digital, bundesweit und mit Ausnahme einer Sommerpause (Juli/August) sowie einer Winterpause (Dezember/Januar) monatlich statt und zwar immer dienstags am Ende eines Monats von 17.00–19.00 Uhr. Zusammen mit einer Teilnahmebescheinigung werden im Nachgang zu jeder Veranstaltung Materialien zum Download zur Verfügung gestellt. Über den jeweiligen Vortrag hinaus erhalten die Teilnehmenden Einblicke in das persönliche wissenschaftliche Schaffen der vortragenden Wissenschaftler/-innen. Sie erfahren und spüren, wie diese für ihr Fachgebiet brennen und mit wie viel Begeisterung und Einsatz sie Forschung betreiben und wo sie die große Bedeutung ihrer Arbeit für die Biologie, für die Biowissenschaften und die Biomedizin und darüber hinaus sehen.

Prof. Felicitas Pfeifer (TU Darmstadt, Fachbereich Biologie, Mikrobiologie und Archaea, und Sprecherin der Fachgesellschaften im VBIO) hielt den ersten Vortrag mit dem Thema „Klein aber oho – die faszinierende Welt der Mikroorganismen“ (Abbildung 1). Mit Bedauern und auch Erstaunen stellte sie fest, wie die Mikroben bei den BiStas scheinbar durchs Raster fallen. Sie schreibt: „Mikroorganismen spielen im Biologieunterricht an Schulen nur eine untergeordnete Rolle, obwohl sie in der Natur überall vorkommen und auf unserer Haut und im Verdauungstrakt in Massen leben. Sie zeigen eine große Stoffwechselvielfalt und produzieren wichtige Stoffe wie Antibiotika oder biotechnologische Produkte. Neben Bakterien und Eukaryoten bilden Archaea die dritte Domäne des Lebens; die Entdeckung dieser Mikroben erweitere unserer Sicht auf mikrobielle Fähigkeiten und Anpassungen immens. Genomweite Vergleiche der Archaea mit Bakterien und Eukaryoten erbrachten neue Er-

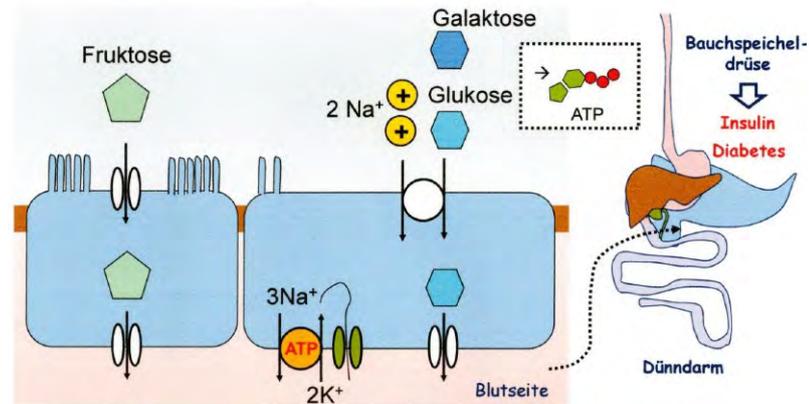


ABB. 2 Spaltung und Resorption von Zucker im Dünndarm.
Abb.: Friederike Stumpff.

kenntnisse über die Entwicklung des Lebens auf unserem Planeten, aber auch über neue Proteine, Enzyme und Lipide zur biotechnologischen Nutzung. Wissenschaftliche Umbrüche verändern den Blick, und das Wissen und die Begeisterung darüber sollten auch in der Schule ankommen.“

Mit ihrem Vortrag zeigte sie, an wie vielen Stellen die Mikroben als hochinteressanter Kontext nicht nur in verschiedenen Inhaltsbereichen/Inhaltsfeldern der BiStas und damit Lehr- und Bildungsplänen ihren Platz finden können, sie konnte auch für andere an biologischen Themen Interessierte ganz neue Einsichten eröffnen. Für alle, die sich am 25.10.2022 zugeschaltet hatten, zeigte sich ein unglaublicher Facettenreichtum zur Bedeutung der Mikrobenwelt.

Am 22.11.2022 trug Prof. Friederike Stumpff (Health and Medical University Potsdam) zum Thema „Mechanismen der Nahrungsaufnahme – Transportphysiologie des Gastrointestinaltrakts“ (Abbildung 2) vor und beschrieb im Kontext der Nahrungsaufnahme im Darmtrakt Sekretions- und Resorptionsprozesse an Epithelien. Neben der enzymatischen Zersetzung der Nahrung wurden auch transportphysiologische Vorgänge erläutert. Der Aufbau der organtypischen Epithelien wurde beschrieben mit ihren hochspezifischen und zum Teil Energie verbrauchenden Transportproteinen, welche die Aufnahme von Ionen, Aminosäuren, Fetten und Zuckern durch

die Zellen hindurch ermöglichen. Die Bedeutung der Natriumpumpe und von Ionenkanälen für diese Prozesse wurde deutlich – aber auch die der Verdauungsenzyme. Zum Abschluss ging es um die wichtige Rolle der Mikroorganismen im Dickdarm!

Nach einer Winterpause setzte Prof. Stephan Clemens am 28.02.2023 die Reihe fort mit dem Thema: „Von Genomen zur Genomeditierung: Techniken, Anwendun-

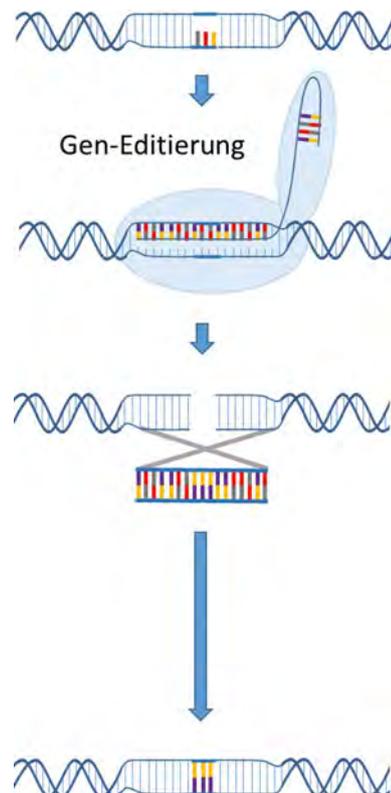


ABB. 3 Mechanismus der Gen-Editierung. Abb.: Karl-Josef Dietz.



ABB. 4 Getreide – eine wichtige Kulturpflanze.
Foto: Klaus Mayer.

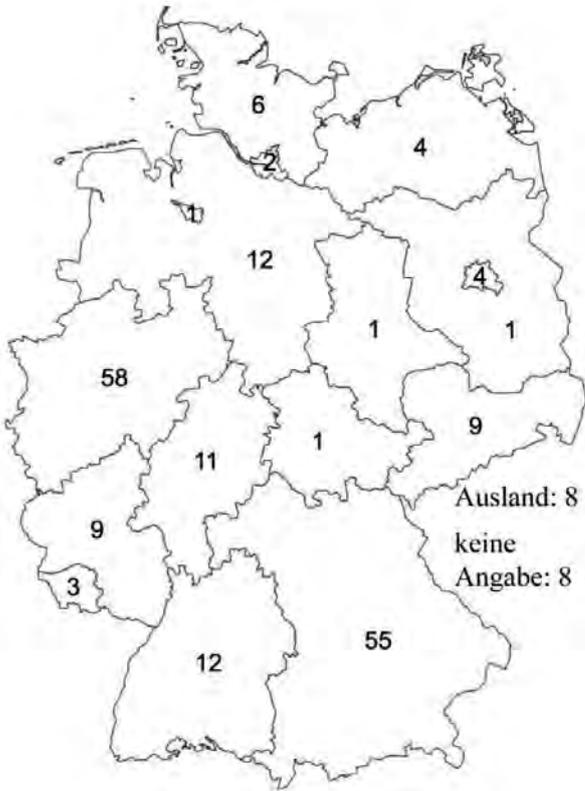


ABB. 5 Durchschnittliche Teilnahme (>50 % der Semindauer) je Bundesland und Ausland nach vier Seminaren.

gen und Potentiale bei Pflanzen“ (Abbildung 3). Im Jahr 2000 – so berichtete er – wurde die erste Genomsequenz der Blütenpflanze *Arabidopsis thaliana* und auch des Menschen veröffentlicht. Etwa 10 Jahre später gelang die programmierbare, zielgenaue genetische Veränderung mittels CRISPR-Cas. Damit begann ein neues Zeitalter der Molekularbiologie. Die schnell wachsende Zahl von Methoden, um Gene gezielt zu inaktivieren oder einzelne DNA-Basen präzise umschreiben zu können, wurde vorgestellt. Hauptaugen-

merk galt bereits realisierten Anwendungen an Nutzpflanzen sowie den Potenzialen der neuen Züchtungsmethoden, z. B. im Dienst einer nachhaltigeren Landwirtschaft.

Zuletzt nahm Prof. Klaus Mayer am 28.03.2023 die Teilnehmenden mit auf eine Reise in die Kultur-(pflanzen)evolution. Mit seinem Vortrag zum Thema „Getreidegenom: Die biologischen Grundlagen der westlichen Zivilisation“ (Abbildung 4) beschrieb er Nutzpflanzen und v. a. Getreidepflanzen und deren Domestikation und Nutzbarmachung sowie ihre Rolle als Fundament für die Entwicklung von Sesshaftigkeit und moderner Zivilisation. Mithilfe moderner Ansätze der Genomsequenzierung sind die wichtigen Getreidegenome, die die Größe und Komplexität des menschlichen Genoms weit übertreffen, inzwischen entschlüsselt und geben Einblicke in deren Organisation und Entstehungsgeschichte, aber auch in die Verbreitungsdynamik im Gepäck unserer Vorfahren. Spannende Einsichten in die Dynamik von Genregulation und in die Kornentwicklung konnten generiert werden und für die gezielte Züchtung kann nun ein vollständiges Repertoire von Getreidegenen gezielt genutzt werden.

Erste Auswertung, Reaktionen und Ausblick

Eine statistische Auswertung zur Teilnahme an den ersten vier Vorträgen aus den Bundesländern und auch dem Ausland zeigt, dass im Schnitt bei jedem Webinar mehr als 200 Personen teilnehmen (Abbildung 5) und nahezu alle bleiben bis zum Ende dabei. Es wird deutlich, dass insgesamt noch zu wenige über dieses wertvolle Angebot informiert sind, denn die Reaktionen auf alle Vorträge, die den VBIO erreichten, waren bisher überaus positiv.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Das gewählte Format mit zwei eingebetteten Pausen, in denen Fragen beantwortet werden, ist gut gewählt. Zahlreiche neue Informati-

onen werden auf Folien nachvollziehbar, strukturiert und übersichtlich in der Präsentation mit ausgezeichneten Abbildungen dargestellt. Der Aufbau der bisherigen Vorträge aus (1) allgemeinen Informationen und Grundwissen, dann (2) einer fachlichen Vertiefung (Sachkompetenz) mit (3) Einblicken in die konkreten Prozesse der Erkenntnisgewinnung hinsichtlich Fachmethoden und Analyse von Forschungsdaten wird begrüßt. Anwendungsbezüge in einem bewertenden Kontext runden (4) die Vorträge ab und machen die gesellschaftliche Relevanz des jeweiligen Themas deutlich.

Die Möglichkeit, auf Augenhöhe mit Wissenschaftler/-innen zu kommunizieren und Fragen zu stellen, wird sehr geschätzt und rege genutzt. Auf die Frage nach dem Gewinn eines solchen Vortrags schreibt Kristina Schnelle, Fachberaterin für Biologie bei der Bezirksregierung Düsseldorf: „Der Vortrag eines Wissenschaftlers/einer Wissenschaftlerin aktualisiert mein Wissen und macht mich sicherer in der Vorbereitung für meinen Unterricht. Es macht einfach Spaß, einen qualitativ hohen Input zu bekommen. Man erkennt wieder neue Facetten, für die sich die Biologieausbildung lohnt!“

Dieses Format „Faszination Biologie“ trifft offensichtlich den Bedarf zur Diskussion und Vertiefung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse – und nicht nur bei Lehrkräften. Inwieweit die Vorträge selbst und die zur Verfügung gestellten Materialien einen Einfluss auf den Schulalltag oder aber auch auf den persönlichen Alltag im biologischen Kontext haben, werden u. a. Aspekte sein, die Gegenstand einer Analyse und Bewertung dieser Reihe zum Ende dieses Kalenderjahres sein werden.

*LRSD' a. D. Marga Radermacher
Sprecherin der Landesverbände
im VBIO*

DOI:10.11576/biuz6426

GENTECHNIKDEBATTE

Nach der ersten Ernte: Wie war das mit dem Golden Rice?

Auf dem gentechnisch veränderten Golden Rice ruhten und ruhen große Hoffnungen, den Vitamin-A-Mangel in vielen Ländern des Südens zu beheben und damit mangelbedingten Erblindungen und Todesfällen vorzubeugen. Auf den Philippinen wurde nun im vergangenen Jahr – nach mehr als 20 Jahren Auseinandersetzungen um das Für und Wider – erstmals eine kleine Ernte von etwa 70 Tonnen eingefahren. Die Kolleg/-innen von BioWissKomm haben dies zum Anlass für ein Interview mit Ingo Potrykus genommen, dessen Name wie kaum ein anderer mit dem Golden Rice verbunden ist.

BioWissKomm: Bei der Entwicklung des Golden Rice gab es Probleme wie bei jedem wissenschaftlichen Projekt: Bei der ersten Version lag der β -Carotin-Gehalt viel zu niedrig.

Potrykus: Falsch, obwohl dies der publizierten Sachlage nach stimmt. Unser erster Prototyp hatte im heterozygoten Zustand 1,6 Mikrogramm/ Gramm Provitamin A. Der heute in den Philippinen angebaute Goldene Reis hat 4–5 Mikrogramm. Es wäre – nach Aussage des Chef-Reiszüchters vom IRRI (*International Rice Research Institute*) Gurdev Khush – ein Leichtes gewesen, diese Lücke in ein paar Rückkreuzungen zu schließen.

BioWissKomm: Bei einer späteren Version wurde ein „Event“, also eine der vielen genetisch veränderten Reispflanzen zur weiteren Züchtung ausgewählt, die anschließend suboptimale Erträge brachte.

Potrykus: Stimmt, aber warum? Pflanzenzüchtung liest „richtige Events“ aus, indem sie Hunderttausende von Individuen auf ihre Reaktion auf klimatische und agronomische Bedingungen im Feld untersucht. Die GMO-Vorschriften verbieten strikt das Ins-Feld-Bringen von GMOs, bevor sie „dereguliert“, d. h. zum Anbau freigegeben sind. Jetzt testen Sie mal die Reaktion auf agronomische und Umweltbedingungen in einer Klimakammer! Die GMO-Vorschriften

verunmöglichten für viele Jahre jede vernünftige Arbeit.

BioWissKomm: In der Wissenschaft sind solche Rückschläge Routine: Man geht ins Labor, sucht die Fehler und arbeitet an der Optimierung.

Potrykus: Das waren keine Routine-Rückschläge, sondern durch die GMO-Regeln verursachte Umwege. Ja, der Gedankengang ist richtig, aber unsere Probleme waren zu 99 Prozent durch die GMO-Regeln bedingt.

BioWissKomm: Bei einem Projekt mit solcher öffentlicher Aufmerksamkeit wurden Rückschläge als „Scheitern“ interpretiert. Was müssen Wissenschaft und Wissenschaftskommunikation tun, um in der Öffentlichkeit mehr Verständnis für und Einsicht in wissenschaftliche Arbeitsweise zu erzeugen?

Potrykus: Mehr Wissenschaftsjournalisten und mehr Geld für Redaktionen, damit sie Wissenschaftsjournalisten einstellen können. Und für alle Medien: mehr politische Ausgewogenheit. Generell sehe ich in den Medien ein Hauptproblem. Sachlich korrekte und informative Artikel, die Raum für eigene Interpretation lassen, sind in der Minderheit. Meinung statt Information ist für mich kein guter Journalismus.

BioWissKomm: Das Konzept des Golden Rice, nämlich Grundnab-

rungsmittel mit Vitaminen und anderen wichtigen Inhaltsstoffen anzureichern, hat sich in der Wissenschaft durchgesetzt: Es gibt z. B. bereits gentechnisch optimierte Cassava und Hirse. Weitere Pflanzen sind in Arbeit oder bereits im Feldversuch. Wo sehen Sie den größten Bedarf für die Zukunft der Welternährung?

Potrykus: Es war das Golden Rice-Projekt, welches das Konzept der „Biofortifikation“ – der Verbesserung des Gehalts an Mikronährstoffen im Erntegut – initiiert und ihm zum Durchbruch verholfen hat. Der Erfolg dieses Projekts hat die *Gates Foundation* bewogen, massiv in den Ansatz der Biofortifikation zu investieren – auch und besonders in GMO-unabhängige Projekte. In Ertragssteigerung und Ertragssicherung investiert weiterhin die Industrie. Und das wird so bleiben, solange Nahrungsmittelqualität nicht durch höhere Preise honoriert wird. Deswegen würde ich weiterhin den Bereich der „Mikronährstoffe“ bearbeiten, mit dem Ziel, den Gehalt in Grundnahrungsmitteln (vor allem Getreide) in Bezug auf möglichst viele Vitamine, Mineralien und essenzielle Aminosäuren zu erhöhen – gleichzeitig in ein und derselben Pflanze! Wir haben bereits im gleichen Jahr wie über den Vitamin A-Reis, über Reis mit erhöhtem Eisengehalt publiziert. Gegenwärtig arbeitet das IRRI an einem Vitamin-A/Eisen/Zink-Reis (Eisen- und Zink-Anämie sind Riesenprobleme). Dieses Konzept der Optimierung möglichst vieler Mikro-

SCHÖPFER DES GOLDEN RICE



Ingo Potrykus ist Professor emeritus für Pflanzenwissenschaften an der ETH Zürich. Er ist ein Pionier der Pflanzengentechnik und entwickelte, zusammen mit Peter Beyer (Universität Freiburg) den Golden Rice im Rahmen eines humanitären Projekts zur Ernährungssicherheit. Sein persönlicher und wissenschaftlicher Lebenslauf ist in seiner Autobiografie dargestellt (<https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-arplant-043014-114734>).

WAS IST GOLDEN RICE?

Reis ist bekanntlich ein Grundnahrungsmittel in Asien und der Hauptlieferant für Kalorien. In vielen Schwellen- und Entwicklungsländern Asiens gibt es deshalb den „verborgenen Hunger“: Hohe Kosten und Mangel an vielseitiger Ernährung führen zu Defiziten bei Mikronährstoffen. Ein großes Problem ist die Vitamin-A-Defizienz (VAD), die zu Erblindung und Tod führt. Man rechnet mit ca. 250.000 bis 500.000 Opfern pro Jahr.

Ingo Potrykus und Peter Beyer haben Ende der 1990er Jahre begonnen, Reis gentechnisch mit Vitamin A anzureichern. Dazu wurden zunächst drei, später nur noch zwei Gene aus anderen Organismen in den Reis eingebaut, um die Produktion von Vitamin A im Reiskorn möglich zu machen. Dabei entsteht das gelb-orangefarbene β -Carotin, das z. B. aus Möhren bekannt ist und dem Reis eine goldgelbe Farbe gibt. β -Carotin wird im menschlichen Körper in Vitamin A umgewandelt. Der Gehalt im Reiskorn ist so hoch, dass 60 Gramm (trockener) Reis pro Tag ausreichen, um den Vitaminmangel zu beheben.

Potrykus und Beyer hatten von Anfang an ein humanitäres Projekt angestrebt. In Verhandlungen wurde der Patentschutz aufgehoben, so dass Kleinbauern das Saatgut kostenlos erhalten und auch nachzüchten können. Auch das Einkreuzen in lokale Sorten ist erlaubt und wird vom International Rice Research Institute (IRRI) unterstützt. Doch bis zur ersten Ernte 2022 war es ein langer, steiniger Weg. Einerseits gab es Verzögerungen bei der Entwicklung, andererseits gab es massive Störkampagnen, die Versuchslandbau und Genehmigungen lange Zeit verhindert haben. Experten kalkulieren, dass diese Auseinandersetzungen die Nutzung um mindestens 12 Jahre verzögert und die Kosten um 65 Millionen Dollar erhöht haben. Den Zeitverlust kann man nach Zahlen der WHO auch in etwa 1,5 Millionen vermeidbare Todesopfer umrechnen.



ABB. Geschälte und polierte Körner vom ursprünglichen weißen Reis (links), Golden Rice 1 (mitte) und Golden Rice 2 (rechts). Die goldgelbe Farbe entsteht durch die Einlagerung von β -Carotin. Foto: Golden Rice Humanitarian Board.

nährstoffe in ein und derselben Pflanze müsste natürlich ausgeweitet werden auf möglichst viele Grundnahrungspflanzen. Dies erfordert eine Kooperation zwischen Gentechnik und Pflanzenzüchtung.

BioWissKomm: *Wie lange hätte Golden Rice (in der heutigen Version) ohne die „Opposition“ gedauert, um ihn aufs Feld zu bringen?*

Potrykus: Nach Aussage des Chef-Reiszüchters am IRRI drei Jahre oder acht Rückkreuzungsgenerationen. Wäre Golden Rice kein GMO gewesen, würde er seit 2003 genutzt und hätte in den fast 20 Jahren Millionen von Kindern vor Erblindenden und Tod bewahrt.

BioWissKomm: *Wie lange hätte es mit konventionellen Kreuzungsmethoden gedauert?*

Potrykus: Unendlich. Geht nicht. Die Reiszüchtung hat vergeblich alles versucht, dieses Ziel zu erreichen und hat deswegen die Gentechnik um Hilfe gebeten. Unser Projekt war die Antwort auf diesen Hilferuf.

BioWissKomm: *Wie lange hätte es mit der „neuen Gentechnik“ CRISPR-Cas gedauert?*

Potrykus: Genau so lang wie mit „konventioneller“ Gentechnik, da CRISPR das nur mit Hilfe der Gentechnik machen könnte. Ein CRISPR-Golden Rice müsste all die regulatorischen GMO-Hürden überwinden, die wir überwunden haben. Er brächte keinen Vorteil.

BioWissKomm: *Das sollten wir vielleicht erläutern: Auch mit CRISPR müsste „Fremd-DNA“ eingebracht werden. Selbst nach Reformierung des EU-Gentechnikrechts würde das Produkt derselben strengen Regulierung unterliegen wie konventionelle Gentechnik.*

Potrykus: Ich warne vor einer grassierenden Hype und einer Konfusion um CRISPR. CRISPR ist eine effiziente Technik zum Einführen von Mutationen. CRISPR wird „verkauft“ als Technik, die das Genom nicht anders als die Natur verändert. Und darauf beruht der Anspruch, von den GMO-Vorschriften ausgenommen zu werden. CRISPR hat Vorteile in Bezug auf *loss-of-function*-Projekte, hat aber große Schwierigkeiten bei *gain-of-function*-Projekten. Ich beobachte zunehmend die kuriose Situation, dass man mit CRISPR ganz normale Gentechnik betreibt (man ersetzt nur *Agrobacterium* durch CRISPR), und wundert sich dann, dass die regulatorischen Autoritäten das zu Recht als Gentechnik verstehen – und regulieren. Pech, dass die Anzahl an attraktiven *loss-of-function*-Projekten sehr beschränkt ist. Andererseits besteht kein Zweifel daran, dass man „Gentechnik“ betreibt – mit allen Conse-

quenzen, wenn man „Fremd-DNA“ mit CRISPR überträgt und diese nicht wieder entfernt. *Gene Editing* kann Gentechnologie nicht ersetzen; sie kann sie ergänzen. *Gain-of-function*-Projekte wie z. B. Golden Rice gehen, mit komplizierten Ausnahmen, nur mit Hilfe der Gentechnik. Man gewinnt in Bezug auf die Regulation überhaupt nichts. Aber hat man sich eigentlich mal Gedanken darüber gemacht, was das in Bezug auf Patentlimitierung heißt? Die *Agrobacterium*-Patente sind praktisch alle abgelaufen. Bei CRISPR stehen wir am Anfang eines jahrzehntelangen, komplizierten Patentstreites. Für die Anwendung ein Horror.

BioWissKomm: *Ein solcher Praxiserfolg von Golden Rice würde die Glaubwürdigkeit der Organisationen schädigen, die ihn über viele Jahre bekämpft haben. Erwarten Sie eine neue Kampagnenwelle, um z. B. die Akzeptanz für Golden Rice in der Bevölkerung zu untergraben?*

Potrykus: Ja.

BioWissKomm: *Herr Potrykus, wir danken Ihnen ganz herzlich für das Interview!*

Die Fragen stellten Hanna Willenbockel, Jann Buttler und Wolfgang Nellen. Eine ausführlichere Version dieses Interviews finden sie unter <https://www.biowisskomm.de/2023/01/keine-ganz-normale-ernte-2/>

Nachtrag der Redaktion: *Der Supreme Court in Manila hat am 18. April 2023 geurteilt, dass der Anbau von Golden Rice (und Bt-Brinjal) gestoppt werden muss. Damit ist die vorsichtig optimistische Sichtweise des Interviews mit Ingo Potrykus hinfällig. Auf die Frage, ob er weitere Aktionen der NGOs gegen Golden Rice erwartet, hatte Potrykus mit einem simplen „Ja“ geantwortet. Das bestätigt sich nun.*

DOI:10.11576/biuz6427

DFG-PRÄSIDENTIN IM GESPRÄCH

Ohne Grundlagenforschung keine Nachhaltigkeit

Noch bis Anfang Juli begeht die UNESCO das International Year of Basic Science for Sustainable Development (IYBSSD). Dieses globale Ereignis ist aus Sicht des VBIO eine sehr gute Gelegenheit, auf die große Bedeutung der Grundlagenforschung, der freien Suche nach neuen Erkenntnissen über Zusammenhänge und wissenschaftsbasierte Chancen für die planetare Zukunft und das Wohlergehen der Menschheit gegenüber der Politik und der Gesellschaft hinzuweisen. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) ist die bedeutendste Einrichtung zur Forschungsförderung in Deutschland. Die Präsidentin der DFG, die Medizinerin und Biochemikerin Professorin Dr. Katja Becker, stellt sich den Fragen des VBIO.

VBIO: Frau Becker, um unser Gespräch mit einem Blick nach vorne und auch ganz aktuell zu beginnen: Wenn die neue Ausgabe von „Biologie in unserer Zeit“ im Mai erscheint, werden Sie gerade in New York gewesen sein und vor den Vereinten Nationen über Nachhaltigkeit gesprochen haben. Worum geht es dabei genau?

Becker: Ich bin auf Einladung der *Ten Member Group* in New York, einem vom UN-Generalsekretär eingesetzten Kreis von Persönlichkeiten aus den Bereichen Wissenschaft, Technologie und Innovation, der die Vereinten Nationen zur Nutzung von Forschung zur Erreichung der globalen Nachhaltigkeitsziele SDG berät. Dazu gehört auch die Vorbereitung des *Multi-stakeholder Forum on Science, Technology and Innovation for the Sustainable Development Goals* – kurz *STI for SDG*, das in diesem Jahr zum achten Mal stattfindet. Ich werde dort den *Global Research Council (GRC)*, also den Weltverband der Forschungsförderorganisationen, dessen Vorsitzende ich noch bis Ende Mai bin, als mögliche Partnerplattform vorstellen. Ich werde aber auch, in einem kurzen Vortrag im UN-Plenum und in einem vom GRC organisierten Side-Event, grundsätzlich auf die besondere Rolle der Grundlagenforschung für die Lösung

der globalen Menschheitsfragen wie der Nachhaltigkeit eingehen. Diese in einem solchen Rahmen zu betonen, vor Regierungsvertreterinnen und -vertretern und Lobbyistinnen und Lobbyisten aus aller Welt, ist mir auch persönlich sehr wichtig. Und es ist ebenso eine besondere Facette des Themas „Nachhaltigkeit“, das auch für die DFG vielfach an Bedeutung gewonnen hat und weiter gewinnen wird.

VBIO: Auf welchen Feldern beschäftigt dieses Thema „Nachhaltigkeit“ die DFG und wo entfaltet sich dabei vielleicht die aktuell höchste Dynamik? Sie haben bereits Ende 2020 angekündigt, dass die DFG ihre Aktivitäten in diesem Bereich intensivieren und systematisch ausbauen will, und im vergangenen Jahr auch eine Präsidialkommission für Nachhaltigkeit eingesetzt hat.

Becker: Wenn Sie nach Dynamik fragen, so kann ich nur sagen: Das gesamte Feld ist aktuell sehr stark in Bewegung. Die vom DFG-Präsidium eingesetzte Kommission mit 20 Mitgliedern aus allen Wissenschaftsgebieten und unter meiner Leitung will schon Ende Juni auf unserer Jahresversammlung den Gremien der DFG Empfehlungen für nachhaltiges Handeln vorlegen. Damit wollen wir der Verantwortung gerecht werden, die der DFG als größter

Förderorganisation und zentraler Selbstverwaltungseinrichtung der Wissenschaft in Deutschland für die Verankerung des Nachhaltigkeitsgedankens in der Forschungsarbeit, im Wissenschaftssystem und auch im eigenen Handeln zukommt.



VBIO: Welche konkreten Ziele sollen hierbei verfolgt werden?

Becker: Wir haben intensiv erörtert und wollen mehr Bewusstsein dafür schaffen, dass Nachhaltigkeitsaspekte in der Forschung sachgerecht und über alle Fächergrenzen hinweg zur Geltung kommen und Forschungsprojekte möglichst nachhaltig durchgeführt werden – ohne dass dabei allerdings die Wissenschaftsfreiheit und die Inhalte und die Qualität der Forschung beeinflusst oder gar gemindert werden. Gleichzeitig befassen wir uns aktuell intensiv in unseren eigenen Prozessen mit Nachhaltigkeitsfragen. Diese reichen von den täglichen Arbeitsabläufen in unserer Geschäftsstelle mit inzwischen mehr als 900 Beschäftigten bis hin zu jährlich vielen Tausend Begutachtungen mit oft internationaler Beteiligung. Bei alledem aber sollte nicht vergessen werden, dass und wo wir schon seit langem in Sachen Nachhaltigkeit aktiv sind: Mit unseren einschlägigen Senatskommissionen und ihrer wichtigen Rolle in der wissenschaftlichen Politikberatung, dem von uns eingerichteten Deutschen Komitee für Nachhaltigkeitsfragen oder im internationalen Belmont-Forum – und natürlich in der Förderung der sehr vielen konkreten Forschungsprojekte zu allen Facetten von Nachhaltigkeit. Hier zeigt sich die Bedeutung von Grundlagenforschung ja auch in anderem Sinne ganz wörtlich: Es geht um die Erforschung der Grundlagen unserer Existenz und der unseres Planeten.

VBIO: Nun sprechen Sie nicht nur in New York und im Zusammenhang mit dem Thema „Nachhaltigkeit“ über die Bedeutung der Grundlagenforschung, son-

dern heben diese bei vielen Gelegenheiten und in vielen Kontexten hervor. Wie beschreiben Sie die Position der DFG zur Grundlagenforschung unseren Mitgliedern und Leserinnen und Lesern – gerade auch in den aktuellen Krisensituationen?

Becker: Die DFG fördert Grundlagenforschung als jene Forschung, die in allererster Linie erkenntnisgetrieben ist und nicht etwa politischen, ökonomischen oder gesellschaftlichen Erwägungen oder Erwartungen entspringt. Gerade eine solche, im besten Sinne zweckfreie Forschung ist von zentraler Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft. Sie kann in besonderem Maße Anwendungen möglich machen, ohne sie vorher versprechen zu müssen. Und sie kann genau jene langfristigen Wissensspeicher schaffen, die in Situationen, die oft nicht antizipiert werden oder auch gar nicht antizipiert werden können, akut benötigte Lösungen bereitstellen.

„Grundlagenforschung ist von zentraler Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft.“

Diese Wirksamkeit erweist sich in der Tat besonders in Krisensituationen. Das beste Beispiel hierfür sind die Impfstoffe gegen das Coronavirus. Wichtige Grundlagen für das mRNA-Vakzin von BioNTech gingen auf ein Forschungsprojekt zurück, mit dem die späteren BioNTech-Gründer schon mehr als ein Jahrzehnt vor Corona an der Universität Mainz von der DFG gefördert wurden – und zwar auf einem ganz anderen Gebiet, nämlich der Krebsforschung. Niemand hätte damals ahnen können, was daraus einmal werden und wofür es einmal notwendig werden würde. Aber nicht nur in der Pandemie, auch beim Kampf gegen den Klimawandel, die

Ressourcenverknappung oder die Folgen der Überbevölkerung kann die Grundlagenforschung zentrale Beiträge leisten und leistet sie bereits.

VBIO: Zusammen mit seinen naturwissenschaftlich-mathematischen Partnergesellschaften der Chemie, Physik, Geologie und Mathematik streitet der VBIO für internationale Zusammenarbeit und Open Science. Auf der anderen Seite stehen gerade imperiale und autokratische Tendenzen, die zur Abschottung und „me first“-Handeln führen. Der alternative Slogan lautet nun „as open as possible, as closed as needed“. Wo steht die DFG in dieser Debatte zwischen Open Science und Schutz von nationalen oder europäischen Interessen?

Becker: Auch die DFG steht für die internationale Zusammenarbeit in der Wissenschaft, sie zu fördern ist sogar eines unserer Satzungsziele. Internationalität ist ganz sicher eines der wichtigsten Kennzeichen moderner Forschung, und der weltweite wissenschaftliche Austausch ist essenziell für die Leistungsfähigkeit der Wissenschaft im Kampf gegen die globalen Herausforderungen. Andererseits wird auch die DFG zunehmend mit dem von Ihnen skizzierten Spannungsfeld konfrontiert. Gerade das vergangene Jahr hat uns allen ja auch eindringlich gezeigt, wie sehr Wissenschaft unter den Einfluss von politischen Krisen und auch Krieg geraten kann. Deshalb war es für uns einerseits nur konsequent, dass wir nach dem russischen Angriff auf die Ukraine alle von uns geförderten deutsch-russischen Kooperationen auf institutioneller Ebene gestoppt haben – eben weil diese Aggression auch alle Werte der Wissenschaft zutiefst verletzt. Und zugleich war dies für uns eine schmerzhaft Entscheidung, weil sie an den Kern und an das Selbstverständnis von Wissenschaft und auch der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler rührte.

Aktuell stellt sich für uns und auch für die von uns Geförderten im Zusammenhang mit China die Frage, wie man mit dem Widerspruch zwischen dem wissenschaftlichen Streben nach Kooperation auf höchstem Niveau einerseits und dem chinesischen Anspruch nach politischer Kontrolle andererseits umgehen soll. Das sind, auch wenn es dann etwa um Dual-Use-Forschung geht, komplexe Fragen und Diskussionen, die wir für uns und unser Förderhandeln führen, für die wir aber auch in der Wissenschaft und bei den Geförderten noch größere Sensibilität erreichen wollen.

VBIO: Wissenschaftliche Projekte in den Naturwissenschaften basieren auf der Kombination vielfältigster Methoden und Verfahren, wie sie vor 25 Jahren kaum vorstellbar oder umsetzbar waren. Dies gibt in den Biowissenschaften und der Biomedizin von hochempfindlicher Analytik über Miniaturisierung zu unvorstellbaren Datenmengen mit Einsatz von (bio-)informatischen Verfahren und künstlicher Intelligenz. Die Komplexitätszunahme verlangt nach Anpassungen auch bei der Forschungsförderung. Wie reagiert hier die DFG auf die gestiegene Komplexität?

Becker: Mit Komplexität sprechen Sie zu Recht ein weiteres Hauptmerkmal moderner Forschung an. Sie bringt, nicht nur in den Lebenswissenschaften, enorme Möglichkeiten mit sich, aber auch enorme Herausforderungen. Wir arbeiten intensiv und auf verschiedenen Ebenen daran, dass wir selbst und die Wissenschaften diese Herausforderungen produktiv nutzen können. Dies geschieht etwa dadurch, dass wir ganze Themenfelder in diesem Kontext erst einmal in ihren Dimensionen erfassen, wie mit unserem Positionspapier zum „Digitalen Wandel in den Wissenschaften“. Zum anderen entwickeln wir sehr zielgerichtete Förderinitiativen und -angebote,

um den spezifischen Handlungsbedarfen zu begegnen, die die wissenschaftlichen Communities uns gegenüber zum Ausdruck bringen. Beispiele hierfür sind die Hochdurchsatzsequenzierung und unsere Initiative *Next Generation Sequencing* (NGS) oder auch unsere Ausschreibung für Emmy-Noether-Nachwuchsgruppen im Bereich der Künstlichen Intelligenz. Schließlich stellen wir unsere Expertise in den Dienst anderer Initiativen, etwa mit der Durchführung der Begutachtungen in der NFDI, der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur des Bundes und der Länder.

VBIO: Der regulatorische Rahmen rund um die experimentellen Naturwissenschaften wird zu einem immer engeren Korsett, das der Wissenschaftsfreiheit und dem Fortschritt die Luft nimmt. In den Biowissenschaften sind dies beispielsweise die hochkomplexen Regeln zum Nagoya-Protokoll und der Nutzung von Digitalen Sequenzinformationen, zum Umgang mit neuen molekularen Methoden (CRISPR/Cas) und der experimentellen Freisetzung so erhaltener Linien. Wie ist der sensible Ausgleich zwischen notwendigem Access and Benefit Sharing und der Wissenschaftsfreiheit sowie Technologiechancen und -risiken zu erreichen?

Becker: Dieses Spannungsfeld und die Notwendigkeit sensiblen Ausgleichs begegnen uns ja nicht nur auf den von Ihnen genannten Feldern, sondern praktisch überall. Deshalb möchte ich hier bewusst auf einer übergeordneten Ebene antworten: Ein solcher Ausgleich ist nur dann zu realisieren, wenn sich alle Akteure ihrer je spezifischen Verantwortungen und ihrer gemeinsamen Verantwortung für das Ganze bewusst sind und danach handeln. Für die DFG ist die Freiheit der Wissenschaft eine zentrale Voraussetzung für die Leistungsfähigkeit der Wissenschaft

und damit für unser aller Zukunftsfähigkeit. Aber wir wissen zugleich, dass mit dieser Freiheit, wie wir sie in Deutschland in einem gerade im internationalen Vergleich ungewöhnlich hohen und sogar verfassungsrechtlich garantierten Maße besitzen, auch eine hohe Verantwortung einher geht. Dieser gerecht zu werden, ist für uns eine absolute Maxime unseres Handelns.

VBIO: Der VBIO steht für die Würde des Lebens und Respekt vor allen Lebensformen. Allerdings gibt es weiterhin wichtige wissenschaftliche Fragestellungen in der biowissenschaftlichen und biomedizinischen Grundlagenforschung, die nur durch wissenschaftliche Tierversuche geklärt werden können. Starke Gruppierungen in der Gesellschaft nicht zuletzt in der EU drängen auf die Abschaffung von Tierversuchen bis hin zur Festlegung eines Exit-Datums mit der Argumentation, dass ausreichend Alternativen zur Verfügung stünden. Wie beurteilt die DFG die Bedeutung von Tierversuchen für den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn und die – aus Sicht des VBIO verfrühte – Forderung nach vollständigem Verbot von Tierversuchen.

Becker: Um es hier vielleicht nur so auf den Punkt zu bringen: In der biomedizinischen Forschung werden grundlegende Erkenntnisse gewonnen, die für das Verständnis komplexer biologischer Prozesse, aber auch weit darüber hinaus essenziell sind. Dazu ist ein breites Repertoire an Methoden notwendig, zu denen auch weiterhin unverzichtbar tierexperimentelle Studien gehören. Das bedeutet aber nicht, dass diese Studien in ihrer Zahl nicht weiter verringert oder wo immer möglich auch durch andere Settings ersetzt werden können. Genauso lässt sich auch das Leid der eingesetzten Versuchstiere weiter mindern. Genau diesen Prinzipien, den

3 R-Prinzipien *replace, reduce* und *refine*, haben wir uns verpflichtet und auf sie verpflichten wir auch alle unsere Antragstellerinnen und Antragsteller und alle geförderten Projekte.

„In der biomedizinischen Forschung ist ein breites Repertoire an Methoden notwendig, zu denen auch weiter tierexperimentelle Studien gehören. Aber es muss unser aller Ziel sein, ihre Zahl und auch das Leid der Versuchstiere so weit wie möglich zu verringern.“

Das ist ganz sicher auch ein Beispiel für die Verantwortung der Wissenschaft, die wir hier mit diesen Prinzipien wahrnehmen, mit unserer Senatskommission für tierexperimentelle Forschung, zusammen mit den anderen Wissenschaftsorganisationen in der Initiative „Tierversuche verstehen“ und auch in der Auseinandersetzung mit den Gegnern tierexperimenteller Forschung, in der wir gegen mitunter auch unsachliche Kritik auf konstruktiven Dialog setzen.

VBIO: Mit großer Sorge beobachten unsere Mitglieder Mittelkürzungen bei verschiedenen Einrichtungen der Forschungsförderung. Dies betrifft vielfach die Grundlagenforschung und die internationale Zusammenarbeit. Muss sich die Wissenschaft in Deutschland auf Mittelkürzungen bei der DFG einstellen? Dies wäre ein großer Rückschlag für die Konkurrenzfähigkeit der Wissenschaft in Deutschland in Zeiten starker und stärker werdender internationaler Mitbewerber und großen Bedarfs an Lösungen beispielsweise im Kontext der globalen Nachhaltigkeitsziele.

Becker: Zunächst einmal sollte auch an dieser Stelle betont werden, dass Wissenschaft und Forschung in Deutschland seit einer ganzen Reihe von Jahren dank weitsichtiger politischer Entscheidungen finanzielle Rahmenbedingungen haben, die vor allem im internationalen Vergleich bemerkenswert gut sind. Die großen Forschungs- und Forschungsförderorganisationen wie die DFG werden für den Pakt für Forschung und Innovation, den PFI, der ihnen einen kontinuierlichen Aufwuchs

garantiert, weltweit sogar geradezu beneidet. Es kann nur im Interesse aller sein, dass dies auch in Zukunft so bleibt. Die Bekenntnisse auch der aktuellen Bundesregierung zum hohen Stellenwert der Wissenschaft und ebenso die kürzlich vorgelegte Zukunftsstrategie sehen wir hier als positive Signale. Gleichwohl und auch wenn etwa der DFG keine direkten Mittelkürzungen drohen, werden wir in den kommenden Jahren sehr grundsätzliche Finanzierungsdiskussionen für das Wissenschaftssystem zu führen haben. In

diese werden wir uns mit ganzer Kraft und im Sinne der ja auch hier wiederholt angesprochenen Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft einbringen.

VBIO: Herzlichen Dank für das Gespräch.

Das Interview führte Karl-Josef Dietz, Präsident des VBIO.

DOI:10.11576/biuz6428

AUS DEM VBIO

Gute Lehrkräftebildung auch in Zeiten von Lehrkräftemangel sichern

Der Biologieunterricht hat eine zentrale Bedeutung für den Erwerb von naturwissenschaftlicher Grundbildung. Guter Biologieunterricht seinerseits ist undenkbar ohne gut ausgebildete Lehrkräfte. Doch die Schulrealität sieht anders aus: Fachfremde Lehrkräfte, Studierende, Seiten- und Quereinsteiger übernehmen zunehmend Unterrichtsverantwortung. Der VBIO hat jüngst einen Impuls vorgelegt, in dem er ein Bündel aufeinander abgestimmter Maßnahmen vorstellt, die dazu beitragen können, den Lehrkräftemangel nachhaltig zu überwinden.

Das Schulfach Biologie stellt im naturwissenschaftlichen Fächerkanon in allen Schulformen und bis zum Abitur die meist belegte Naturwissenschaft dar. Dem Biologieunterricht kommt damit eine zentrale Bedeutung für den Erwerb von naturwissenschaftlicher Grundbildung

(*Scientific Literacy*) junger Menschen zu. Für das Verständnis und den Umgang mit aktuellen Herausforderungen – wie beispielsweise dem Ausbruch von Pandemien, dem globalen Klimawandel, dem Verlust an Biodiversität oder der Sicherung der Welternährung – nimmt die biologische Perspektive eine Schlüsselrolle ein.

Zur Bewältigung der genannten Herausforderungen sind in der Biologie neben dem allgemeinen Grundverständnis biologischer Vorgänge in der breiten Bevölkerung auch ausgezeichnet ausgebildete Fachkräfte und (Spitzen-)Forschung essenziell. Vor diesem Hintergrund wird insbesondere dem Schulfach Biologie und der Lehrkräftebildung Biologie eine herausragende Bilanzverantwortung zuteil.

Der besonderen Bedeutung biologischer Bildung und Forschung für die Zukunft wirken aktuelle Tendenzen in der Lehrkräftebildung und der Schulrealität durch den akuten Lehrkräftemangel entgegen. Prominente Beispiele hierfür sind:

- Biologie-Lehramtsstudierende werden sehr früh und weitestgehend unbegleitet in den Schulen für Vertretungsunterricht herangezogen.
- Personen ohne zweite Staatsprüfung übernehmen im Schuldienst Verantwortung, für die sie keine ausreichenden Qualifikationen und Erfahrungen haben.
- Fachfremde Lehrkräfte übernehmen Unterrichtsverantwortung.

Diese Entwicklungen sind bedenklich, denn sie fördern eine Gewöhnung an unreflektierte fachliche, fachdidaktische und pädagogische Routinen und gehen damit zu Lasten einer reflexiven Haltung, die professionelles Lehrkräftehandeln auszeichnet.

Appell an alle Entscheidungsträger/-innen

Als Dachverband der Biologie appelliert der VBIO an alle Entscheidungsträger/-innen in Politik, Verwaltung, Bildung und Weiterbildung besonders in der aktuellen Situation des Lehrkräftemangels

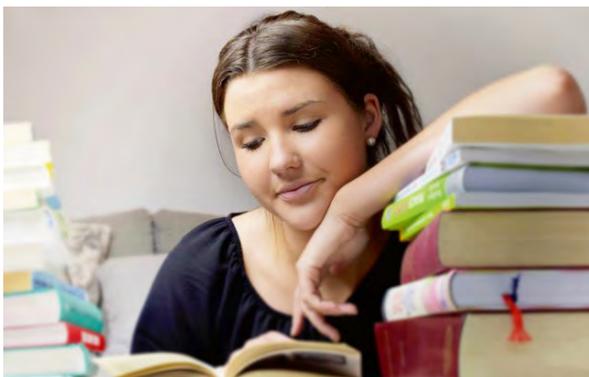


Foto: Silvia auf www.pixabay.com.

bei der Entwicklung von Lösungen verantwortungsvoll zu agieren und an den gemeinsam vereinbarten Standards festzuhalten. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Standards einer professionellen Biologie-Lehrkräftebildung (KMK, 2004 i. d. F. von 2019) [1] für die Qualitätssicherung aller Phasen der Lehrkräftebildung sowie die Gestaltung von Programmen zum Quer- und Seiteneinstieg (GFD, 2018) [2].

Der VBIO hat 2019 in einem Positionspapier [3] die Notwendigkeit hoher fachspezifischer Standards in der Biologielehrkräftebildung betont und hierzu entsprechende Empfehlungen vorgelegt. Vor diesem Hintergrund bringt der VBIO gerne seine Expertise in eine zukünftige Professionalisierung der Lehrkräfte hinsichtlich einer wissenschaftlich fundierten fachdidaktischen und unterrichtspraktischen Lehrkräftebildung ein.

Die Empfehlungen des VBIO

- **Finanzierung sicherstellen**
Die Hochschulen sowie alle Bildungsträger der Lehrkräftebildung müssen mit den entsprechenden finanziellen und personellen Ressourcen ausgestattet werden, um die Lehrkräftebildung fachlich angemessen und in dem erforderlichen Umfang sicherzustellen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Biologielehrkräftebildung mit ihrem hohen experimentellen Anteil und der erforderlichen Praxiserfahrung in besonderem Maße von einer guten finanziellen und personellen Ausstattung abhängig ist.
- **Quer- und Seiteneinstieg nur mit qualifizierenden Begleitprogrammen und nach bundesweiten Standards**
Sollte zur Behebung des akuten Lehrkräftemangels der Lehrberuf kurzfristig für Quer- und Seiteneinsteiger/-innen aus den Fachwissenschaften geöffnet werden, so muss dies durch be-

gleitende Programme flankiert werden. Diese müssen durch gezielte Bildungsmaßnahmen sicherstellen, dass neben den voraussetzenden fachlichen Kompetenzen auch fachdidaktische und pädagogische Kenntnisse erworben werden. An der Entwicklung und Umsetzung sind Vertreter/-innen aller Phasen der Lehrkräftebildung zu beteiligen [3]. Dabei gilt, dass Standards für Programme des Quer- und Seiteneinstiegs bundesweit transparent formuliert, verbindlich festgehalten und entsprechend umgesetzt werden.

- **Polyvalente Studiengänge fördern**

Unabhängig von kurzfristigen Programmen für Quer- und Seiteneinsteiger/-innen ist langfristig der Auf- und Ausbau von polyvalenten Studiengängen notwendig. Dadurch kann die Anschlussfähigkeit der Fach- und Lehramtsstudiengänge (und somit zukünftige Möglichkeiten für den Quereinstieg bzw. dem Umstieg) systematisch sichergestellt werden.

- **Attraktive und passgenaue Fort- und Weiterbildungen**
Die Biologie ist eine hochdynamische Wissenschaft und erfordert stetige Fort- und Weiterbildung der Lehrkräfte. Zusätzlich müssen neue fachdidaktische und pädagogische Fragestellungen Gegenstand dieser Fort- und Weiterbildungen sein. Die Bildungsveranstaltungen für Lehrkräfte müssen wissenschaftlich fundiert sein und begleitend evaluiert werden. Sie sind ein essenzieller Baustein der Qualitätssicherung und der Weiterentwicklung von individuellen Kenntnissen und Fähigkeiten. Es bedarf daher eines differenzierten, passgenauen Angebotes. Dieses ist verpflichtend und muss während der Arbeitszeit stattfinden [4].

- **Überforderungen vermeiden, Begleitung verpflichtend machen**

Studierende, fachfremd unterrichtende Lehrkräfte sowie Quer- und Seiteneinsteiger/-innen müssen während ihrer Tätigkeit in der Schule durch bedarfsgerechte Mentorate professionell betreut und beraten werden. Hierfür sind durch die Bildungsadministration ausreichende personelle und finanzielle Ressourcen zur Verfügung zu stellen. Studierende dürfen erst nach längerer studienbezogener Praxiserfahrung an Schulen tätig werden. Dabei darf das reguläre Studium nicht beeinträchtigt werden.

Monitoring der Maßnahmen von Beginn an umsetzen

Um den Erfolg der oben genannten Einzelmaßnahmen abschätzen zu können, muss ein umfangreiches Monitoring von Beginn an vorgesehen werden. Dies beinhaltet unter anderem auch die Bestandsaufnahme, Bewertung und Weiterentwicklung von Modellen des Quer- und Seiteneinstiegs, wie auch von der SWK empfohlen. Das zu implementierende Monitoring muss aber deutlich darüber hinausgehen, um das notwendige Steuerungswissen zur Verfügung zu stellen. Das Monitoring ist entsprechend eng verknüpft mit einer noch zu entwickelnden Gesamtkonzeption einer zukünftigen Lehrkräftebildung mit vielfältigen Zugangswegen.

Ein Bündel abgestimmter Maßnahmen

Die skizzierten Maßnahmen adressieren unterschiedliche Zeithorizonte, Handlungsebenen und Akteure. Diese gilt es gut aufeinander abzustimmen und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit stetig zu überprüfen. Wir sind überzeugt, dass jenseits des aktuellen Handlungsdruckes nur ein solches Maßnahmenbündel sicherstellen wird, dass der Lehrkräftemangel nachhaltig überwunden wird. Ziel aller Anstrengungen ist es,

sicherzustellen, dass stets eine ausreichende Anzahl ausgezeichnet ausgebildeter und durch geeignete aktuelle Fortbildungen weiter qualifizierte Lehrkräfte zur Verfügung stehen.

Dieser Impuls wurde entwickelt vom Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBIO e. V.), der Fachsektion Didaktik der Biologie im VBIO (FDdB) und dem Arbeitskreis Schulbiologie im VBIO. Für Rückfragen stehen Prof. Dr. Kerstin Kremer (Kerstin.Kremer@didaktik.bio.uni-giessen.de) und Prof. Robert Hänsch (r.haensch@tu-braunschweig.de) aus dem Präsidium des VBIO gerne zur Verfügung.

Literatur

- [1] Kultusministerkonferenz – KMK (2004): Standards für die Lehrerbildung: Bildungswissenschaften (Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004 i. d. F. vom 16.05.2019) https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_1_6-Standards-Lehrerbildung-Bildungswissenschaften.pdf (zuletzt abgefragt am 03.04.2023)
- [2] Gesellschaft für Fachdidaktik – GFD (2018): Ergänzende Wege der Professionalisierung von Lehrkräften Positionspapier der GFD zur Problematik des Quer- und Seiteneinstiegs. <https://www.fachdidaktik.org/wordpress/wp-content/uploads/2015/09/PP-20-Positionspapier-der-GFD-2018-Erg%C3%A4nzende-Wege-der-Professionalisierung-von-Lehrkr%C3%A4ften.pdf> (zuletzt abgefragt am 03.04.2023)
- [3] Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland – VBIO (2019): Positionspapier Lehrkräftebildung Biologie https://www.vbio.de/fileadmin/user_upload/Schule/pdf/VBIO_Position_Lehrkraeftebildung_Biologie_beschlossen_am_24.6.19.pdf (zuletzt abgefragt am 03.04.2023)
- [4] Wissenschaft verbindet (2022): Positionspapier der Fachgesellschaften zu Fort- und Weiterbildung von Lehrkräften für mathematisch-naturwissenschaftliche Fächer. <https://wissenschaft-verbundet.de/gemeinsame-aktivitaeten/positionspapier-der-fachgesellschaften-zu-fort-und-weiterbildung-von-lehrkraeften-fuer-mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher> (zuletzt abgefragt am 03.04.2023)

Kerstin Elbing, VBIO

DOI:10.11576/biuz6429

GENTECHNISCHES ARBEITEN

Arbeitsfähigkeit der ZKBS gefährdet



Die Zentrale Kommission für die Biologische Sicherheit (ZKBS) ist das zentrale Expertengremium, das in Deutschland geplante gentechnische Arbeiten auf ihr Risiko für Mensch und Umwelt bewertet. Die vom ZKBS erarbeiteten Stellungnahmen dienen als Richtlinien für Entscheidungsverantwortliche in Politik und Verwaltung, insbesondere für die jeweiligen Landesbehörden, die für die Bewilligung und Überwachung gentechnischer Vorhaben und Anlagen zuständig sind.

Bei bestimmten gentechnischen Arbeiten ist eine Stellungnahme der ZKBS mit Empfehlungen zu baulich-technischen, organisatorischen und persönlichen Schutzmaßnahmen zwingend gesetzlich vorgeschrieben, bevor die zuständige Behörde den Beginn der Arbeiten bescheiden kann. Die Durchführung von Forschungsarbeiten ab Sicherheitsstufe 2, wie die Entwicklung von Impfstoffen, Krebstherapeutika und Gentherapien oder die Erforschung von potenziellen Pathogenen, kann ohne einen Bescheid der zuständigen Behörde auf der Basis der ZKBS-Stellungnahmen nicht begonnen werden. Hier sind sehr enge Zeitfenster

gesetzlich vorgesehen, um die Verfahren schnellstmöglich zum Abschluss bringen zu können.

Die ZKBS besteht aus 24 Sachverständigen aus biowissenschaftlichen Bereichen wie der Genetik, Mikrobiologie, Ökologie oder Virologie. Hinzu kommen 16 sachkundige Personen, die verschiedene gesellschaftliche Interessensgruppen vertreten. Berufen werden die Expert/-innen für drei Jahre in einem rotierenden Verfahren. Das federführende Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) ist gesetzlich verpflichtet, mit anderen Bundesministerien (BMBF, BMAS, BMG, BMUV, BMWK)

einen Konsens bei jeder einzelnen Berufung herzustellen. Für den gesamten Bereich der Biotechnologie und viele biomedizinische Ansätze ist die Funktionsfähigkeit der ZKBS für den Forschungs- und Wirtschaftsstandort Deutschland absolut essenziell.

Bereits früher gab es Verzögerungen bei der Besetzung der ZKBS. Aufgrund der Vielzahl an offenen Positionen in der ZKBS ist aber erstmals eine zügige Bearbeitung von Anträgen nicht mehr gewährleistet (www.zkbs-online.de/ZKBS/Shared-Docs/00_Fachmeldungen/2023/2022_01_30_Fa_Berufungssituation.html). Die ZKBS hat die Zuständigen in den Ministerien mehrfach darauf aufmerksam gemacht. Angeblich ist die Abstimmungsarbeit zwischen den zuständigen Ressorts bei der Neu- und Wiederberufung von ZKBS-Mitgliedern zu aufwendig. Dies darf aber nicht zu Lasten der Verfahren gehen, zumal die Antragsteller/-innen einen gesetzlichen Anspruch auf eine zügige Stellungnahme der ZKBS haben und die ZKBS ihrerseits engen gesetzlichen Fristen unterliegt.

Derzeit sind bereits sieben Positionen im Bereich der sachverständi-

gen wissenschaftlichen ZKBS-Mitglieder nicht besetzt oder laufen aus. Ab Juni 2023 werden 12 Positionen vakant sein, somit fast die Hälfte aller Sachverständigen. Am stärksten ist der Bereich der Virologie betroffen, in dem drei von fünf der Sachverständigen zur Disposition stehen. 70 Prozent der von der ZKBS zu bearbeitenden Themen betreffen virologische Aspekte, die vor dem Hintergrund der gerade durchgestandenen Pandemie sicher als gesellschaftspolitisch hoch relevant einzustufen sind. Eine Einschränkung und Verzögerung gerade auch dieser Forschungstätigkeiten in Deutschland ist nicht hinnehmbar. Der Wissenschaftsrat ist als gesetzlich zuständiges Fachgremium längst aktiv geworden und hat geeignete Kandidat/-innen benannt. Nun ist das BMEL am Zug.

Brief an Bundesminister

Der VBIO hat sich mit einem Brief an den zuständigen Bundesminister Özdemir gewandt, um den unhaltbaren Zustand so rasch wie möglich abzustellen. Parallel wurden auch die Vertreter der Länderbehörden sowie weitere Betroffene informiert. Inzwischen ist eine ganze Reihe an Fachgesellschaften aktiv geworden, die ihrerseits das BMEL auf die un-

haltbaren Zustände rund um die ZKBS hinweisen.

Im Bereich der sachkundigen ZKBS-Mitglieder aus gesellschaftlichen Bereichen sind insbesondere die Positionen im Umweltschutz und im Naturschutz unbesetzt, außerdem eine Position mit Sachverständigen aus der Wirtschaft. Darüber hinaus müssen dringend beide Sachkundigen im Arbeitsschutz wiederberufen werden. Die einschlägigen Verbände und Fachgesellschaften stehen mit dem BMEL in Verbindung, um fachlich geeignete Kandidat/-innen zu finden.

Der VBIO hat das BMEL eindringlich aufgefordert, seiner gesetzlichen Pflicht zur Besetzung der ZKBS nachzukommen und schnellstmöglich die Wiederbesetzung bzw. Verlängerung insbesondere der Sachverständigen zu veranlassen, die die Hauptlast der Begutachtungen tragen. Nur so kann die Arbeitsfähigkeit der ZKBS sichergestellt werden. Außerdem weist der VBIO ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei der Berufung von Sachverständigen um inhaltlich begründete Einzelfallentscheidungen handeln muss, die nicht mit anderen offenen Fragen verknüpft werden! Insbesondere dürfen die Berufungen der Sachverständigen nicht von der Berufung

von Sachkundigen abhängig gemacht werden. Auch eine geschlechterparitätische Besetzung ist erstrebenswert, aber kein Selbstzweck. Die persönliche Qualifikation sollte immer die oberste Priorität haben. Die Vorschläge für eine Mitgliedschaft in der ZKBS als Sachverständige/r erfolgen durch den Wissenschaftsrat, der die erforderliche wissenschaftliche Expertise eingehend prüft. Auch bei den Sachkundigen sollte eine persönliche (bio)wissenschaftliche Qualifikation im jeweiligen Gebiet vorhanden sein, um sachkompetent in der ZKBS mitwirken zu können.

Erste Signale aus den Bundesbehörden deuten nun darauf hin, dass im Mai die dringend notwendige Arbeitsfähigkeit der ZKBS wiederhergestellt werden könnte. Hoffentlich einigen sich die Bundesministerien auch gleich auf ein nachhaltig funktionierendes Berufungsverfahren, das dem gesetzlichen Auftrag der ZKBS als zentrales Expertengremium für biologische Sicherheit angemessen ist. Die Wissenschaft benötigt eine funktionsfähige ZKBS.

Carsten Roller, VBIO

DOI:10.11576/biuz6430

DAS WISSENSCHAFTSSYSTEM ALS GANZES IM BLICK BEHALTEN – IMPULS DES BIOLOGENVERBANDS ZUM WISSENSCHAFTSZEITVERTRAGSGESETZ

Faire und realistische Berufsperspektiven sind wesentlicher Baustein einer erfolgreichen Forschungslandschaft. Bei der anstehenden Novellierung des Wissenschaftszeitvertragsgesetzes (WissZeitVG) muss daher das Wissenschaftssystem als Ganzes im Blick behalten werden, mahnt der Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBIO). In seinem Impuls fordert der VBIO insbesondere die Qualifizierungsphase nach der Doktorarbeit nicht zu kürzen und Anschlussverträge rechtzeitig abzuschließen. Notwendig

sind Personalkonzepte, die mehr Flexibilität ermöglichen sowie eine bessere Grundfinanzierung von Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte brauchen faire und angemessene Verträge.

Lesen Sie weiter auf <https://idw-online.de/de/pressreleases1163>

Foto: Philip Wels.



EXKURSION

Meeresbiologie in der Praxis: Eine studentische Exkursion in die marinen Lebensräume des Mittelmeeres

Meeresbiologische Forschung ist für Studierende der Universität Oldenburg aufgrund der Nähe zur Nordsee nicht unbekannt. Um auch andere Lebensräume kennenzulernen, machte sich eine Gruppe Studierender unter der Leitung von Prof. Pedro Martinez-Arbizu auf eine 14-tägige Exkursion in die wärmeren Gewässer des Mittelmeeres auf.

Praxiserfahrungen sind ein zentraler Bestandteil der meisten Biologiestudiengänge. Neben der Arbeit im Labor gehört auch die Feldforschung nach wie vor zum Alltag vieler Biolog/-innen. Aufgrund der Einschränkungen im universitären Betrieb durch die Corona-Pandemie mussten viele Studierende jedoch während der letzten Semester auf diese Erfahrungen verzichten. Eine Gruppe von 20 Studierenden der Universität Oldenburg freute sich daher umso mehr darauf, im letzten Sommersemester eine marinbiologische Exkursion in den Toskanischen Archipel zu unternehmen. Ziel der

Exkursion war es, Erfahrungen mit meeresbiologischem Arbeiten unter Wasser zu sammeln und die wichtigsten Arten des Lebensraumes Mittelmeer kennenzulernen.

Da die meisten Studierenden im Vorfeld der Exkursion noch nicht mit der Arbeit unter Wasser vertraut waren, musste zuerst der Umgang mit ABC-Ausrüstung erprobt werden. Dafür stand der Gruppe im Verlauf des Sommersemesters mehrere Wochen lang das Schwimmbad der Universität zur Verfügung, in dem sich die Studierenden mit Schnorchel, Maske, Flossen sowie Neoprenanzug und Bleigurt vertraut

machten und einfache Aufgaben wie das Binden von Knoten und Fotoaufnahmen unter Wasser üben konnten. Auch die Artenkenntnis des Mittelmeeres brachten sich die Studierenden in wöchentlichen semesterbegleitenden Vorträgen über einzelne Taxa der mediterranen Flora und Fauna gegenseitig näher.

Auf dem Weg ans Mittelmeer

Nach einer wohlverdienten Pause zum Ende des Semesters brach die Gruppe unter der Leitung von Prof. Pedro Martinez-Arbizu Anfang September gemeinsam nach Italien auf. Ihr Ziel: Die kleine Insel Giglio vor der Küste der Toskana. Giglio ist eine etwa 21 km² große Insel und zusammen mit dem besser bekannten Elba Teil des Toskanischen Archipels. Weltbekannt wurde die kleine Insel durch die Havarie der Costa Concordia im Jahr 2012, die vor Giglio Porto, dem Fährhafen der Insel, auf Grund lief und kenterte. Während der Überfahrt mit der Fähre konnte die Reisegruppe bereits vom Wasser aus die bergige Landschaft Giglios mit der für den



ABB. 1 Übersicht über die Bucht Campese Pertuso. Gut erkennbar sind die Seegraswiesen im Vordergrund sowie eines der erwähnten Betonfundamente. Am rechten Bildrand ist die Siedlung Campese zu sehen.

mediterranen Raum typischen Macchia ausmachen.

Nach insgesamt etwa 16 Stunden Reisezeit legte die Gruppe schließlich mit der Fähre in Porto an und fand sich kurze Zeit später in Giglio Campese wieder. Die kleine Siedlung im Westen beherbergt den größten Sandstrand der Insel und ist zugleich Standort des Instituts für Marine Biologie (IfMB), welches es sich zur Aufgabe gemacht hat, Schulklassen, Studierendengruppen und interessierten Laien die faszinierende Tier- und Pflanzenwelt des Mittelmeeres näherzubringen. Die Mitarbeitenden des Institutes versorgten die Studierenden nicht nur mit hilfreichen Informationen über die Bucht Campeses (Abbildung 1), sondern auch mit noch fehlender Schnorchelausrüstung, bevor die Gruppe nach der ersten Nacht auf der Insel die Feldarbeit aufnahm.

Die Artenvielfalt in der Bucht Campeses

Als die Studierenden am nächsten Morgen den Strand betraten, erstreckte sich die Bucht von Campese vor ihnen. Der touristisch genutzte Sandstrand geht über gut 200 m flach auf etwa 8 m Wassertiefe ins Meer über, bis der Boden plötzlich steiler abfällt – auf Tiefen, die für Schnorchelnde nicht mehr zu erreichen sind. Der sandige Boden der Bucht ist vielerorts frei von Bewuchs, an anderen Stellen bewachsen mit dem Neptungras *Posidonia oceanica*, das ausladende Seegraswiesen bildet (Abbildung 2).

Aufgrund der abwechslungsreichen Habitatstruktur der Bucht ist die Artenvielfalt in Campese Pertuso für den Schnorchelnden beeindruckend. Neben typischen Arten des Mittelmeeres wie der Streifenbarbe (*Mullus surmuletus*) oder der Zweibindenbrasse (*Diplodus vulgaris*), die auf dem Sediment zusammen nach Futter gründeln [1], finden sich im Freiwasser vor allem große Schwärme von Riffbarschen wie *Chromis chromis*, die oft mit einigen hundert Tieren in der Strömung stehen.



ABB. 2 Eine typische Seegraswiese (*Posidonia oceanica*) in etwa 9,5 m Tiefe aufgenommen. Hier lassen sich viele scheue Arten beobachten, die zwischen dem Seegras Schutz suchen.

Nach besonders windigen Nächten trifft man auf viele Spiegeleiquallen (*Cotylorhiza tuberculata*, Abbildung 3) und Leuchtquallen (*Pelagia noctiluca*), von denen letztere zum Teil starke Vernesselungen zufügen kann – eine relativ schmerzhaft Erfahrung wie einige Teilnehmende später feststellen mussten. An alten, in der Bucht freistehenden Fundamenten lassen sich zahlreiche sessile Arten wie bunte Röhrenwürmer, Wachsrosen und in größeren Tiefen auch Kolonien der hermatypischen, also riffbildenden [2], Steinkoralle *Cladocora caespitosa* finden. Rings um die Betonfundamente schwimmen farbenfrohe Lippfische; in ihren Wohnhöhlen lassen sich kleine graue Schleimfische finden, und in Felsspalten im Dunkeln beobachtet man neben verschiedensten Echinodermaten den auffallend roten Meerbarbenkönig (*Apogon imberbis*). Selten sahen die Schnorchelnden auch scheue Arten wie die Mittelmeer-Muräne (*Muraena helena*) oder den Kraken *Octopus vulgaris*.



ABB. 3 Spiegeleiqualle (*Cotylorhiza tuberculata*), aufgenommen an der Wasseroberfläche. Aufgrund der geringen Nesselwirkung wird die Art gerne von Jungfischen zum Schutz und als Versteck genutzt.



ABB. 4 Drachenkopf (*Scorpaena* sp.), aufgenommen beim Nachtschnorcheln in etwa 2,5 m Tiefe. Die Tiere sind Lauerjäger und warten auf dem Boden auf Beute.

Schnorchelerfahrungen vom Boot und bei Nacht

Unterstützt von den Mitarbeitenden des IfMB unternahm die Gruppe an sonnigen Tagen entlang der Insel Bootstouren, auf denen sie an verschiedenen Buchten haltmachend auch andere Habitate der Küstengewässer Giglios kennenlernte. Die gemäßigten Septembernächte ließen ebenso die wohl spannendste Erfahrung der Reise zu: Das Schnorcheln bei Nacht, bei dem die Gruppe mit Taschenlampen ausgerüstet die nachtaktiven Tiere der Bucht beobachtete. So ließen sich neben Skorpionsfischen (Abbildung 4) vor allem Cephalopoden wie der Kalmar *Loligo vulgaris* oder *Sepia officinalis* beobachten. Nachts umgab die Studierenden das Meeresleuchten, ein Phänomen, welches durch die Biolumineszenz von Dinoflagellaten verursacht wird [3]. Bei mechanischer Reizung werden die Mikroorganismen im Wasser zum Leuchten angeregt und als viele blaue Punkte im Wasser sichtbar, so dass die Gruppe bei ausgeschalteter Taschenlampe durch die Bewegung im Wasser ein diffuses blaues Lichtermeer erzeugte.

Ausgerüstet mit Kameras hielten die Studierenden während der ersten

Woche vor Ort ihre Eindrücke und die gefundenen Arten fest, um diese später an Land mithilfe geeigneter Literatur zu bestimmen. Ihre Artenkenntnis festigte die Gruppe zusätzlich durch Bestimmungsübungen an gesammelten Organismen in den Laboren des IfMB.

Feldforschung am praktischen Beispiel

Nachdem die Studierenden die Bucht und ihre Arten kennengelernt hatten, folgte in der zweiten Woche der Exkursion eine in Zweiergruppen durchgeführte Feldstudie, deren Datenerhebung von den Teilnehmenden selbst durchgeführt wurde. So bestimmten die Studierenden die Größe und Verteilung von Seeanemonen, quantifizierten Spezies-Spezies-Interaktionen zwischen bodenlebenden Fischen oder kartierten die Biodiversität eines Teils der Bucht. Unterstützt durch die Lehrenden des Kurses konnten die Studierenden so die Planung und Durchführung biologischer Feldstudien üben.

Die gesammelten Daten wurden im Anschluss an die Exkursion ausgewertet und in Projektberichten, die nach den Anforderungen einer wissenschaftlichen Publikation ge-

schrieben wurden, festgehalten. Ihre Forschungsergebnisse diskutierte die Gruppe später untereinander in einem selbstorganisierten Symposium.

Die Studierenden sind sich einig: Die Exkursion nach Giglio hat ihnen nicht nur wertvolle praktische Erfahrungen, sondern auch ein einzigartiges Erlebnis beschert, das sie so schnell nicht vergessen werden. Für alle, die einmal die faszinierende Unterwasserwelt des Mittelmeeres kennenlernen möchten, ist die Insel Giglio mit ihren Buchten definitiv eine Reise wert.

Literatur

- [1] M. De Pirro et al. (1999). Foraging interactions among three benthic fish in a *Posidonia oceanica* reef lagoon along the Tyrrhenian Coast. *Journal of Fish Biology* 54, 1300–1309, <https://doi.org/10.1006/jfbi.1999.0958>
- [2] H. Schuhmacher, H. Zibrowius (1985). What is hermatypic? *Coral Reefs* 4, 1–9, <https://doi.org/10.1007/BF00302198>
- [3] W. H. Biggley et al. (1969). Stimulable and spontaneous bioluminescence in the marine dinoflagellates, *Pyrodinium bahamense*, *Gonyaulax polyedra*, and *Pyrocystis lunula*. *The Journal of General Physiology* 54(1), 96–122, <https://doi.org/10.1085/jgp.54.1.96>

*Thilo Appeldorn &
Ben Kamphausen,
Universität Oldenburg*

EPIGENETIK

DNA-Methylierung und Temperaturanpassung von Austern im *common-garden*-Experiment

Austern sind wichtige Riffbildner an den Meeresküsten und werden schon lange zum Verzehr in Aquakultur gezüchtet. Das macht sie zu einem geeigneten Modelltier in der Biologie. Common-garden-Experimente zeigen den Einfluss der Umwelt auf das Erscheinungsbild und die zugrundeliegenden epigenetischen Mechanismen: Im Gezeitenbereich ist die DNA-Methylierung der Austern gering, viele Gene sind aktiv. Die Muscheln wachsen hier zwar langsamer und bleiben kleiner als ihre weniger exponiert lebenden Artgenossen im tieferen Wasser, passen sich aber besser an Temperaturänderungen und Hitzestress an.

Innerhalb einer Art können einzelne Individuen abhängig vom Lebensraum verschieden aussehen, man spricht von Modifikationen im Erscheinungsbild. So eine phänotypische Plastizität bietet besonders in wechselhaften Lebensräumen einen Spielraum zur Anpassung an Stressbedingungen. Ohne langwierige Selektion und Evolution können auf diese Weise Individuen entstehen, die an die jeweiligen Umweltbedingungen angepasst sind. Bei gleichem Genotyp gibt es Unterschiede im Phänotyp: Es liegt keine selektiv veränderte DNA-Basensequenz vor, sondern lediglich ein anderes Muster der Genaktivität. Zu den Mechanismen dieser epigenetischen Vorgänge gehören Histon-Modifikation, RNA-Interferenz und DNA-Methylierung.

Bei einer DNA-Methylierung werden Methylgruppen an die Cytosin-Nukleotide gehängt und so Gene inaktiviert. Methylierungsmuster lassen sich labortechnisch gut erfassen und haben Aussagekraft in der Ökologie, Entwicklungs- und Evolutionsbiologie. Entsprechende Untersuchungen an Fischen, Schildkröten und Korallen zeigen, dass sich marine Wirbellose durch unterschiedliche DNA-Methylierung sehr schnell an Salzgehaltsänderung, Versauerung und Temperaturanstieg des Meerwassers anpassen können [1].

An der Meeresküste verändert sich die Temperatur täglich und jahreszeitlich sehr stark und beeinflusst

die Stoffwechselrate der hier lebenden, wechselwarmen Meerestiere. Dazu gehört die Pazifische Auster (*Crassostrea gigas*), die inzwischen auch an der Nordseeküste vorkommt (Foto und [2]). Sie siedelt sowohl in der Gezeitenzone (Litoral) als auch in dauerhaft überfluteten Küstenzonen (Sublitoral). Eier und Spermien von Austern beider Lebensräume mischen und finden sich im freien Wasser. Die entstehenden Muschel-Larven litoralen und sublitoralen Ursprungs leben planktonisch, bis sie sich nach einigen Monaten an der Küste festzementieren. Austern in der Gezeitenzone wachsen langsamer und sind kleiner als die sublitoralen Artgenossen, dafür aber hitzetoleranter. Es gibt also Unterschiede im Phänotyp ausgewachsener litoraler und sublitoraler Austern.

Common-garden-Experiment

Um zu untersuchen, ob es sich dabei um genetische oder epigenetische Unterschiede handelt, setzte eine Forschergruppe aus China eine Variante des *common-garden*-Experimentes (Gemeinschaftsgarten) ein [3]. Wie der Name „Garten“ vermuten lässt, wurde diese klassische Experimentform ursprünglich für Genotyp-Phänotyp-Umwelt-Untersuchungen von Pflanzen konzipiert. Sie eignet sich aber auch für fest-sitzende Tiere wie die Austern. Bei einem *common-garden*-Experiment werden Individuen aus verschiede-



ABB. 1 Pazifische Austern in Hafenanlagen der Nordseeküste. Foto: Inge Kronberg.

nen Lebensräumen (bei der Auster Litoral und Sublitoral) vorübergehend zusammen in einem Gemeinschaftsgarten (hier unter konstanten Laborbedingungen) gehalten und zur Fortpflanzung gebracht. Die Nachkommen sind genetisch also nicht auf bestimmte Umweltbedingungen vorselektiert. Eine Hälfte dieser Folgegeneration wird während der (Larval-)Entwicklung einem veränderten Umweltfaktor (Hitzeschock: 6 h bei 35°C im Labor) ausgesetzt, die andere bleibt unbeeinflusst. Von diesen beiden Gruppen wird anschließend wieder jeweils eine Hälfte (der Jungmuscheln) in die unterschiedlichen natürlichen Lebensräume (Käfige in Litoral bzw. Sublitoral) ausgesetzt. Beim Austern-Experiment gab es also vier in Käfigen gehaltene Austern-Gruppen: Eine mit und eine ohne Hitzeschock im Litoral, eine mit und eine ohne Hitzeschock im Sublitoral. Anschließend wurden Phänotyp, Methylierungsmuster und Genexpression der vier Gruppen verglichen.

Das Ergebnis [4]: Im Litoral ist die Methylierung der Austern geringer als im Sublitoral; es sind also mehr Gene aktiv – vor allem solche, die für Entwicklungsprozesse und Apoptose kodieren. Das macht diese Muscheln plastisch und anpassungsfähig für die starken Temperaturschwankungen in ihrem Lebensraum, bremst aber ihr Wachstum. Im Sublitoral ist die Methylierung dagegen höher; es sind also weniger

Gene aktiv und zwar vor allem solche, die für die Homöostase zuständig sind. Sublitorale Austern zeigen dadurch weniger phänotypische Plastizität und sind weniger anpassungsfähig. Bei den mit Hitzeshock behandelten Austern sind die Unterschiede zwar etwas deutlicher, aber offenbar spielen die Umweltbedingungen während der langfristigen Entwicklung im Lebensraum eine größere Rolle als ein kurzzeitiger Stressfaktor.

DNA-Methylierungen vermitteln das unterschiedliche Erscheinungsbild von Austern bei der Anpassung an verschiedene Umweltbedingungen. Diese neuen Einsichten in die Epigenetik der phänotypischen Plastizität verbessern das Verständnis von Akklimatisierung und Anpassung. Die Anpassungsfähigkeit von Austern an erhöhte Temperaturen ist nicht nur für die Aquakultur von Austern wichtig, sondern auch für den Küstenschutz durch Austern-

riffe und deren Fortbestand im Klimawandel.

Literatur

- [1] A. Li et al. (2018). *Front. Physiol.* 9, 825, 125.
- [2] I. Kronberg (2011). Austern – mehr als Luxus. *Biologie in unserer Zeit* 41, 232–233.
- [3] P. de Villemereuil et al. (2016). *Heredity* 116, 249–254.
- [4] X. Wang et al. (2021). *Heredity* 126, 10–22. <https://doi.org/10.1038/s41437-020-0351-7>

Inge Kronberg, Bäum

ZELLBIOLOGIE

Bringt Gewebe in Form: die Basallamina

Die Basallamina, eine dünne Proteinschicht im extrazellulären Raum, umgibt nahezu alle Gewebe. Durch die Vermittlung biochemischer und physikalischer Signale spielt sie dabei eine aktive Rolle in der Gestaltung, aber auch beim Erhalt von Geweben und Organen. Die Veränderung der molekularen Zusammensetzung moduliert diese Fähigkeiten.

Die *Global tissue revolutions* [1], eine Publikation aus der Fachzeitschrift *Science* des Jahres 2011, löste in der Tat einen Hype um die Rolle der Basallamina in der aktiven Gestaltung von Geweben und Organen aus. Im genetischen Modellorganismus *Drosophila melanogaster* migrieren die Follikelzellen der Eikammer (Abbildung 1) auf der umschließenden Basallamina. Die kollektive Bewegung führt zur Rotation

des gesamten Gewebes. Die Basallamina gewinnt dadurch eine strukturelle Polarisierung (Abbildung 2). Diese und wahrscheinlich weitere Mechanismen führen zu einer mechanischen Heterogenität der Basallamina. In ihrer zentralen Region ist die Basallamina steifer als an der vorderen und hinteren (anterioren und posterioren) Region der Eikammer [2], [3]. Jene Ungleichheit führt dazu, dass die Basallamina

dem immensen Wachstumsdruck lokal unterschiedlich entgegenhält. Eine ursprünglich runde Eikammer dehnt sich entlang ihrer anterior-posterioren Achse aus und bekommt eine ellipsoide Form (Abbildung 1). [4].

Die mechanischen Eigenschaften der Basallamina spielen eine wichtige Rolle bei der ordnungsgemäßen Ausdehnung der sich entwickelnden Eikammer. Welche molekularen Mechanismen und wie die individuellen Proteine der



ABB. 1 Eikammern von *Drosophila melanogaster* in verschiedenen Entwicklungsstadien. Fluoreszenzfärbung des filamentären Aktins (f-Aktin) an Entwicklungsstadien von Eikammern in verschiedenen Stadien. Frühe Entwicklungsstadien sind rund und dehnen sich entlang ihrer Längsachse aus. Abgebildet sind Stadien zwischen 2–8 (v. li. n. re.). Die einzelnen Eikammern sind im Inneren aus den Keimbahnzellen und darauf liegenden somatischen Follikelzellen zusammengesetzt. Einzelne Eikammern werden durch Stielzellen verbunden.

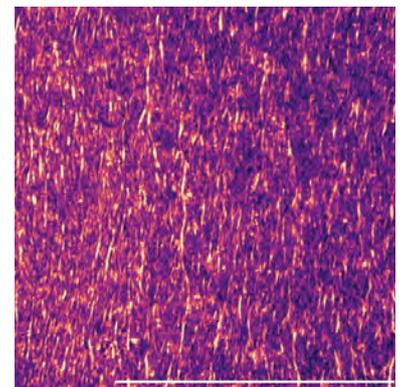


ABB. 2 Verteilung von Kollagen IV in der Basallamina einer Eikammer im Stadium 8. Die Basallamina der Eikammer bekommt neben ihrer flachen Organisation (lila), polarisierte, konzentrierte Strukturen (gelb, weiß). Diese faserartige Organisation wird bis Stadium 8 etabliert und beinhaltet alle Hauptkomponenten der Basallamina. Gezeigt ist hier ein Fusionsprotein von Kollagen IV mit einem grünfluoreszierenden Protein (GFP) in einer Intensitätsskala mit niedrigem Signal in lila und hohem Signal in weiß. Messbalken: 50 µm.

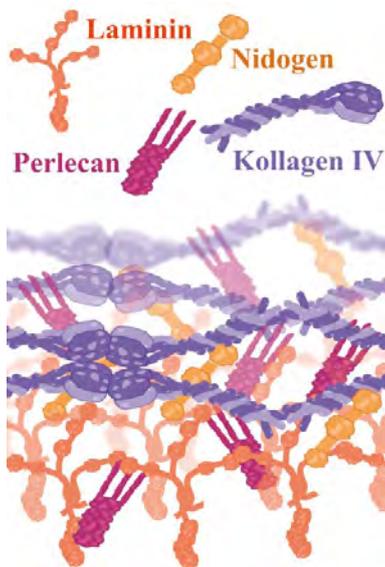


ABB. 3 Schematische Darstellung einer Basallamina. Laminine (orange) sind Heterotrimeren, die mit sich selbst und Zelloberflächenrezeptoren interagieren, um ein Laminin-Netzwerk an der Zelloberfläche zu generieren. Kollagen IV (lila) bildet eine Tripelhelix und mit den N- und C-terminalen Enden ein aufliegendes Netzwerk. Die Proteine Nidogen (sonnenblumengelb) und Perlecan (weinrot) interagieren sowohl mit Lamininen als auch mit Kollagen IV, um diese Netzwerke zu verknüpfen.

Basallamina zu den mechanischen Eigenschaften der Basallamina beitragen, ist jedoch nicht vollständig bekannt. Versuche, in denen einzelne Komponenten der Basallamina durch genetische Manipulation reduziert wurden, zeigen die unterschiedlichen Rollen dieser Proteine während der Entwicklung und für die Vermittlung der biomechanischen Fähigkeiten der Basallamina [3].

Molekulare Zusammensetzung der Basallamina

Die Zusammensetzung von extrazellulären Matrices (EZM) kann überaus komplex sein. Allerdings stellt die Basallamina hierbei eine über das Tierreich hoch konservierte EZM dar und besteht fast immer aus mindestens vier Hauptkomponenten: Laminin, Kollagen IV, Nidogen und Perlecan [5]. Sie wird dann – je

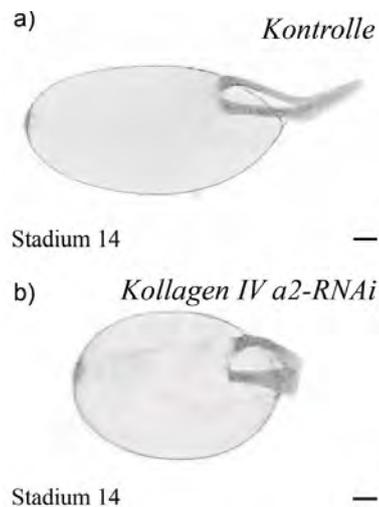


ABB. 4 Auswirkungen des Verlusts von Kollagen IV auf die Eikammerform im Stadium 14. Wildtypische Eier im finalen Stadium 14 weisen eine ellipsoide Form auf (a). Der Verlust von Kollagen IV führt zu runden Eikammern im Stadium 14 (b). Dunkelfeldmikroskopische Aufnahmen, bei denen die Farben invertiert wurden. Messbalken (rechts unten): 50 µm.

nach Gewebe – mit einer Vielzahl weiterer Proteine ergänzt. Während Laminine von fast jedem Gewebe hergestellt werden und eine tragende Rolle für die Initiierung der Basallamina haben [6–7], verknüpfen das Glykoprotein Nidogen und das Heperansulfat-Proteoglycan Perlecan die Lamininschicht mit einem darüber liegenden Kollagen IV-Netzwerk (Abbildung 3, [8]). Der Verlust von Nidogen verändert zwar nicht den grundlegenden Aufbau [9], scheint aber eine Rolle für die Stabilität der Basallamina zu haben [10]. Der Verlust von Perlecan hingegen führt zu verstärkten mechanischen Eigenschaften der Basallamina [11].

Modulierbare Gewebeform

Die gezielte genetische Manipulation der Zusammensetzung der Basallamina wirkt sich auf die Form der Eikammer während der Entwicklung von *D. melanogaster* aus. So führt der Verlust von Nidogen zu einer temporär runderen und der Verlust von Laminin zu einer zeit-

weise länglicheren Eikammer. Langfristige Auswirkungen haben hingegen die Verluste von Perlecan und Kollagen IV. Während Perlecan einen moderaten Phänotyp aufweist, führt der Verlust von Kollagen IV zu beinahe runden Eiern (Abbildung 4). Diese Änderungen der Form gehen mit unterschiedlichen Steifigkeiten der – durch Verlust der einzelnen Proteine erzeugten – Basallaminae einher [3] und könnten die Fertilität reduzieren.

Literatur

- [1] S. L. Haigo, D. Bilder (2011). Global tissue revolutions in a morphogenetic movement controlling elongation. *Science* 331, 6020 1071–1074.
- [2] J. Crest et al. (2017). Organ sculpting by patterned extracellular matrix stiffness. *Elife* 6, <https://doi.org/10.7554/eLife.24958>.
- [3] U. Töpfer et al. (2022). Distinct contributions of ECM proteins to basement membrane mechanical properties in *Drosophila*. *Development* 149, 10.
- [4] S. Horne-Badovinac (2014). The *Drosophila* Egg Chamber-A New Spin on How Tissues Elongate. *Integr. Comp. Biol.* 54, 667–676.
- [5] R. O. Hynes, (2012). The evolution of metazoan extracellular matrix. *J. Cell Biol.*, 196,6,671–679.
- [6] C. H. Streuli et al. (1995). Laminin mediates tissue-specific gene expression in mammary epithelia. *J. Cell Biol.* 129, 591–603.
- [7] U. Töpfer et al. (2019). Serpent/dGATAb regulates Laminin B1 and Laminin B2 expression during *Drosophila* embryogenesis. *Sci. Rep.* 9, 15910.
- [8] E. Hohenester, P. D. Yurchenco (2013). Laminins in basement membrane assembly. *Cell Adh. Migr.* 7, 56–63.
- [9] U. Töpfer, A. Holz (2020). Analysis of extracellular matrix composition in the visceral muscles of Nidogen mutant larvae in *Drosophila*. *microPublication Biol.*, 10.17912/micropub.biology.000251
- [10] G. Wolfstetter et al. (2019). Characterization of *Drosophila* Nidogen/entactin reveals roles in basement membrane stability, barrier function and nervous system patterning. *Development* 146, dev168948.
- [11] J. C. Pastor-Pareja, T. Xu (2011). Shaping Cells and Organs in *Drosophila* by Opposing Roles of Fat Body-Secreted Collagen IV and Perlecan. *Dev. Cell* 21, 245–256.

Uwe Töpfer, TU Dresden

BILDGEBENDE VERFAHREN

Künstliche Intelligenz in der Mikroskopie

Die Untersuchung von Zellkulturen mithilfe mikroskopischer Verfahren ist oftmals eine zeitaufwändige und fehleranfällige Aufgabe. Künstliche Intelligenz und Automatisierung können Anwendern dabei helfen, schneller und besser zu mikroskopieren. Lesen Sie, wie ein neues Mikroskop-System bei der Zellanalyse unterstützt.

Die optische Vergrößerung zellulärer Prozesse und Strukturen mit verschiedenen Mikroskopie-Techniken ist unabdingbar für die Zellbiologie. Die Zellkultur steht am Anfang jedes Experiments und begleitet die Laborroutine (Abbildung 1). Zelllinien müssen hergestellt, kultiviert und für Experimente vorbereitet werden. Dies erfordert Know-how, basierend auf Erfahrung. Um die tägliche Arbeit im Zelllabor zu erleichtern, bieten sich Anwendungen an, die auf künstlicher Intelligenz (KI) und Automatisierung basieren. So wie KI uns bereits in unserem täglichen Leben, vom automatisierten Fahren über Heimassistenten bis hin zur Spracherkennung, Übersetzung oder Sicherung von Smartphones mit Gesichtserkennung unterstützt, kann sie auch im Zelllabor die wiederkehrenden Arbeitsabläufe

deutlich effizienter und reproduzierbarer gestalten. Ein weiterer Vorteil von KI-basierten Anwendungen besteht darin, dass sie in der Regel benutzerfreundlich sind und auch Anwender ohne Programmiererfahrung oder technisches Fachwissen adressieren. Fehler werden reduziert und auch wechselnde Nutzer am System sind kein Problem. Die Ergebnisse bleiben akkurat und wiederholbar.

Die tägliche Arbeit im Zelllabor

Zellkultur ist die Grundvoraussetzung für die meisten Experimente in der Zellbiologie und auch für viele industrielle Anwendungen wie Arzneimittelscreening oder die Herstellung verschiedener biologischer Produkte. Die Vorteile der Arbeit mit Zellkulturen gegenüber komplexeren Modellorganismen sind offen-

sichtlich. In der Zellkultur sind die meisten Parameter des Experiments steuerbar. Physikalische Umgebungsbedingungen wie Sauerstoffgehalt, Temperatur, Feuchtigkeit etc. sowie die spezifische Behandlung sind so plan- und durchführbar, dass sie reproduzier- und kontrollierbar sind. Die tägliche Arbeit im Zelllabor besteht zum Großteil aus Vorbereitung und Pflege. Alle 24 Stunden müssen die kultivierten Zellen kontrolliert und versorgt werden. Zusätzlich hat jede Labortätigkeit ihre eigenen Anforderungen, was Vorbereitung und Durchführung angeht. Wenn man mit Zellen arbeitet, sind alle Türen und Fenster geschlossen zu halten. Die Filter der Laminar-Flow-Box müssen regelmäßig erneuert werden. Auch das Wasser im Wasserbad des Inkubators sollte regelmäßig gewechselt und mit antimikrobiellen Mitteln behandelt werden.

Zellkulturen richtig behandeln

Die Vorteile von Zellkulturen können nur genutzt werden, wenn sie bestimmten standardisierten Prozessen folgen, um sicherzustellen, dass die Zellen immer gleich behandelt werden. Zellen müssen unter zell- und experimentenspezifischen Bedingungen kultiviert werden. Dazu gehören Art und Zusammensetzung der Kultur, Medium, CO₂-Gehalt und Temperatur sowie die Beschaffenheit der Kulturoberfläche oder mögliche Co-Kulturen.

Um normales physiologisches Wachstum zu gewährleisten, müssen Zellen täglich hinsichtlich Wachstumsrate und Zelldichte im Kulturgefäß (Konfluenz) beurteilt werden sowie auf ungewöhnliche Morphologie und mögliche Verunreinigungen hin überprüft werden. Ein Teil der Zellen wird dann aus der regulären Zellkultur entnommen und für Experimente verwendet. Dabei werden sie in dafür vorgesehene Kulturgefäße überführt.

Für die Experimente sollten die Bedingungen der Zellkultur so gut

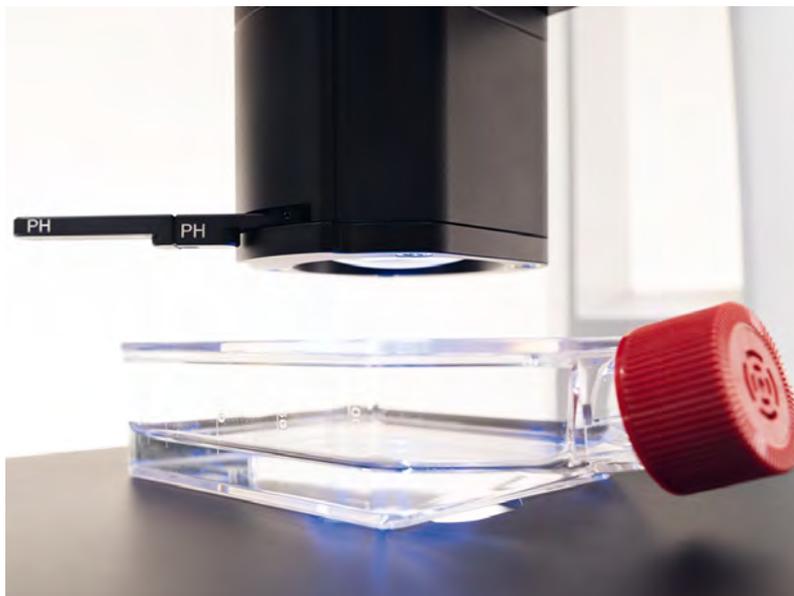


ABB. 1 Die Untersuchung von Zellkulturen mithilfe mikroskopischer Verfahren ist oftmals eine zeitaufwändige und fehleranfällige Aufgabe.

wie möglich standardisiert sein. Je weniger Varianz in der Zellzahl und der Zelldichte, umso besser sind die Voraussetzungen, ein hohes Level an experimenteller Reproduzierbarkeit zu erzielen. Es ist bekannt, dass zelluläre Reaktionen u. a. von der Zelldichte in der Kultur und dem Level an Zell-Zell-Kontakten abhängig sind. Diese Parameter sind jedoch nicht einfach in einem Kulturgefäß zugänglich.

Zellzählungen sind arbeitsintensiv, kosten viel Zeit und sind zudem fehleranfällig. Daher finden in der Praxis häufig nur grobe, subjektive Abschätzungen statt. Zellzahl und Zellkonfluenz sind generell wichtige Parameter bei der Arbeit mit adherenten Zellkulturen wie COS-7, HeLa, LoVo und U2OS. Sie sind entscheidend, um die Vermehrung und Lebensfähigkeit von Zellen zu bestimmen, die Umgebungsbedingungen anzupassen, Zellen zu splitten oder zu passagieren, Transfektionen durchzuführen und Experimente vorzubereiten. Und beide Werte – Zellkonfluenz und Zellzahl – müssen unabhängig von Form, Größe und Typ der Zelle erfasst und ausgewertet werden können. Wer das manuell versucht, braucht viel Zeit und Geduld. Darüber hinaus sind die Ergebnisse fehleranfällig und subjektiv. Automatisierung und KI können hier helfen.

KI im Labor

Das neue All-in-One Cell Imaging System ZEISS Axiovert 5 digital schafft hier Abhilfe: Es erleichtert die tägliche Arbeit im Zelllabor durch KI und automatische Funktionen. Von der Laborroutine bis zur Grundlagenforschung, vom Phasenkontrast bis zur Mehrkanal-Fluoreszenzbildgebung – das System ermöglicht Bildaufnahmen und quantitative Analysen mit nur einem Klick (Abbildung 2). Prozesse werden effizienter und Ergebnisse besser reproduzierbar. Das System verfügt über ein intuitives Bedienungskonzept. Auch unerfahrenen Nutzern gelingen mit ZEISS Axiovert 5 digital



ABB. 2 ZEISS Axiovert 5 digital Zellkulturmikroskop mit KI.



ABB. 3 Das Kontrastverfahren lässt sich durch eine Handbewegung umstellen.



ABB. 4 Ein Knopfdruck genügt und ZEISS Axiovert 5 digital stellt alle wesentlichen Parameter ein.

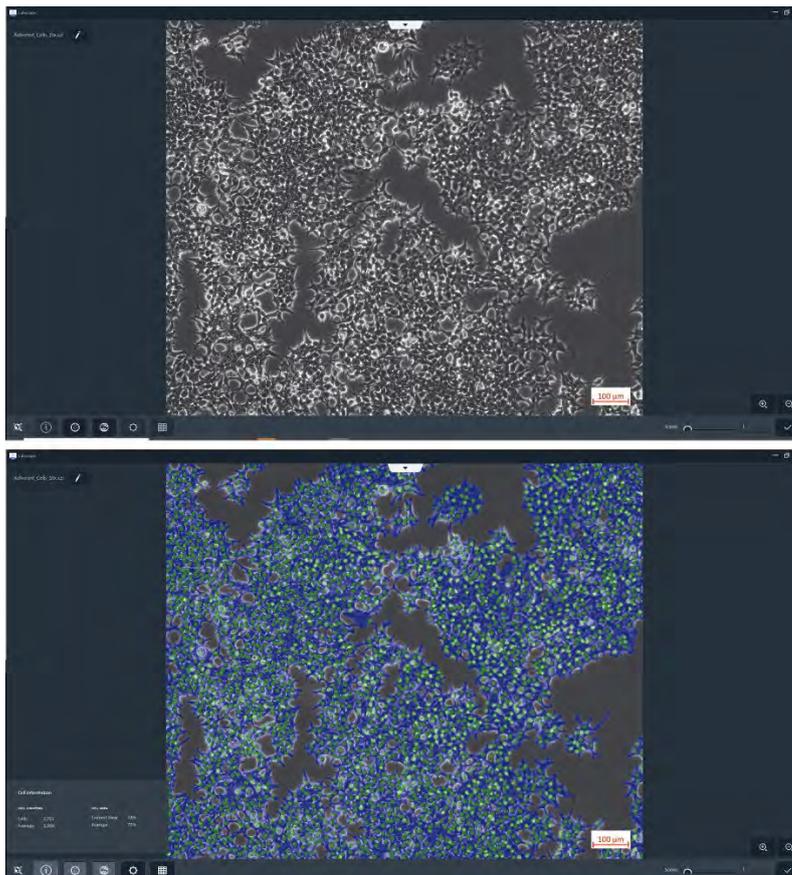


ABB. 5 Mit Hilfe von KI wird die Anzahl und Konfluenz der Zellen analysiert.

qualitativ hochwertige Bilder, denn Einstellungen oder Anpassungen werden automatisch vorgenommen.

Flexibilität und Geschwindigkeit

Mit Hellfeld-, Phasen- und Fluoreszenzkontrast können Laborfachkräfte und Forschende Zell- oder

Gewebekulturen untersuchen (Abbildung 3). Mit nur einem Knopfdruck passt das System die Belichtungszeit automatisch an, erfasst das Bild, schaltet den Kanal um und startet erneut (Abbildung 4). Die Bilder werden mit allen Metadaten des Mikroskops inklusive Skalierungsinformationen gespeichert. Das ergonomische Design von ZEISS Axiovert 5 digital erleichtert die Bedienung und eignet sich daher perfekt für Umgebungen mit mehreren Benutzern. Per Knopfdruck können Nutzer Einzelbilder, Mehrkanalbilder oder Videos aufnehmen – ohne Training oder Vorwissen.

KI-unterstützte Workflows

ZEISS Axiovert 5 digital unterstützt Arbeitsabläufe optimal mittels KI. Um die Anzahl der Zellen und die zellbedeckte Fläche automatisch zu analysieren, stehen die ZEISS *Labscope Module AI Cell Confluency* und *AI Cell Counting* zur Verfügung. Sie fügen sich nahtlos in den Routine-Workflow ein. An der Art, die Zellen zu untersuchen, ändert sich nichts. Nutzer müssen lediglich die Probe fokussieren und den Bildaufnahme-Knopf drücken. Diese Bilder werden automatisch analysiert. Das Ergebnis wird umgehend angezeigt – visuell und quantitativ (Abbildung 5). Das System unterstützt die Arbeiten in der Zellkultur-Routine optimal und erhöht die experimentelle Reproduzierbarkeit durch die einfache Charakterisierung von Zellzahl und Zelldichte direkt im Probengefäß. Damit leistet das System einen bedeutenden Beitrag, um die Zellkulturqualität zu verbessern und zu standardisieren.

Autoren

Dr. Michael Gögler,
Anke Koenen,
Carl Zeiss Microscopy GmbH

ORNITHOLOGIE

Wie sich Vogelspermien bei der Fixierung verändern

Um Vogelspermien für spätere Untersuchungen zu konservieren, werden sie meist in Formalin oder Ethanol fixiert. Welchen Einfluss dies auf die Beschaffenheit der Spermien hat, wurde nun am Naturhistorischen Museum der Universität Oslo untersucht.

Um Spermien etwa für DNA-Analysen untersuchen oder auch genau vermessen zu können, ist es wichtig, sie so zu konservieren, dass ihre strukturelle Integrität erhalten bleibt. Formalin ist dazu ein weit verbreitetes Fixier- und Aufbewahrungsmittel. Jedoch haben bislang nur wenige Studien die Auswirkungen der Fixierung und langfristigen Aufbewahrung auf ihre morphologische Integrität untersucht. Auch Ethanol ist ein gängiges Mittel zur Fixierung und Lagerung von Gewebeproben.

Am Naturhistorischen Museum der Universität Oslo, einem der wenigen Institutionen dieser Art, die weltweit über eine der umfangreichsten Sammlungen von Spermaproben bei Vögeln verfügt, ging man nun der Frage nach, ob die Fixierung und Lagerung in Formalin oder Ethanol die Größe und strukturelle Beschaffenheit von Spermien verändert [1]. Um mittelfristige und

Langzeiteffekte zu ergründen, wurde die Spermienlänge an den Tagen 45, 146 und 227 nach der Einlagerung in jeweils einem der beiden Fixiermitteln gemessen. Bei der Untersuchung von Proben von Grünfink (*Chloris chloris*), Kernbeißer (*Coccothraustes coccothraustes*, Abbildung 1a), Blaumeise (*Cyanistes caeruleus*), Kohlmeise (*Parus major*), Haussperling (*Passer domesticus*, Abbildung 1b) und Wacholderdrossel (*Turdus pilaris*) war man offenbar recht zufrieden mit den Ergebnissen: Es fanden sich „keine signifikanten Auswirkungen des Fixierungsprozesses auf frische, in Formalin oder Ethanol“ eingelagerte Spermien. „Weiterhin gab es keine einheitlichen Längenveränderungen bei Spermien, die über einen Zeitraum von 227 Tagen in Formalin oder Ethanol gelagert wurden oder bei Spermien, die drei Jahre lang in Formalin aufbewahrt wurden,“ so ein Fazit von Gaute Gronstol und Kollegen.

Über eine Lagerungszeit von 13–14 Jahren war eine geringe, aber signifikante Verringerung der Spermienlänge von 0,93 Prozent feststellbar, zudem blieben die ursprünglich in Formalin fixierten Spermien bei trockener Lagerung auf Objektträgern für mindestens sechs Monate recht stabil. „Der Anteil der Spermien mit Schäden an den Samenköpfen war jedoch bei den in Ethanol gelagerten Proben wesentlich höher als bei den in Formalin aufbewahrten. Insgesamt wiesen 70 Prozent der Spermien in Ethanol einen Akrosomschaden auf, während es in Formalin nur drei Prozent waren,“ so das Langzeitresümee. Daher sei das Auffinden intakter Spermien für die Längenmessung bei Ethanolproben wesentlich aufwendiger als bei Formalinproben. „Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Verwendung von Spermazellen aus der Langzeitlagerung für die Untersuchung der Spermienmorphometrie für beide Fixierungsmittel gerechtfertigt ist, obwohl Formalin die Spermazellen eindeutig besser konserviert,“ so das abschließende Fazit.

Literatur

- [1] G. Gronstol et al. (2023). Journal of Ornithology 164, 171–181.

Wilhelm Irsch, Reblingen-Siersburg

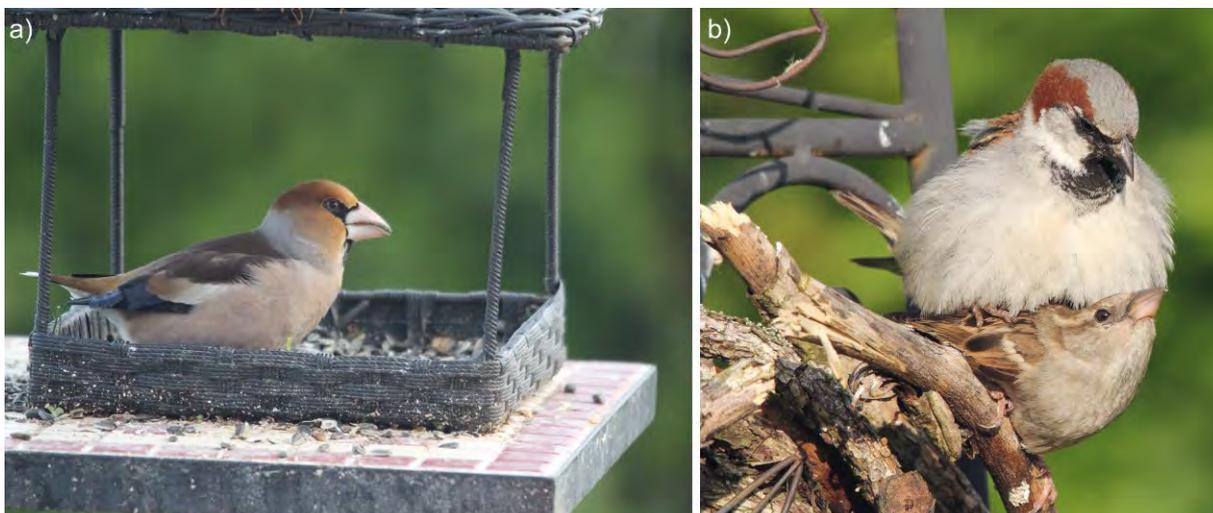


ABB. 1 Zu den untersuchten Vögeln gehörten der Kernbeißer (a) und der Haussperling (b).

ENTWICKLUNGSBIOLOGIE

Wie die Zygote aus den Startlöchern kommt

Damit sich eine befruchtete Eizelle – die Zygote – zum Embryo entwickeln kann, müssen im Genom die Weichen neu gestellt werden. Kürzlich wurden zwei Pionierfaktoren identifiziert, denen im Stellwerk der embryonalen Genexpression eine Schlüsselfunktion zukommt.

Die Entwicklung der Zygote zum Embryo erfordert umfangreiche Veränderungen bezüglich der Genregulation. Denn unmittelbar nach der Befruchtung wird das in den beiden Pronuklei getrennt vorliegende Erbgut beider Eltern noch nicht abgelesen; stattdessen dominieren die von der Eizelle in die Zygote eingebrachten mütterlichen Boten-RNAs und Proteine das Geschehen in der Zelle. Besonders das väterliche Chromatin ist äußerst dicht gepackt, da während der Spermatogenese die mit der DNA assoziierten Histone durch Protamine (kleine, argininreiche, globuläre Proteine) ersetzt wurden. Um eine gleichwertige Expression des mütterlichen und väterlichen Genoms sicherzustellen, muss dieser Austausch kurz nach der Befruchtung rückgängig gemacht werden. Außerdem sind

Eizelle und Spermium hoch spezialisierte Zellen, deren Eigenschaften während der Differenzierung durch epigenetische Modifizierungen wie Methylierungen der Nukleobasen festgelegt wurden. Erst wenn auch diese Veränderungen rückgängig gemacht wurden, erlangt die Zygote die für die Embryonalentwicklung erforderliche Totipotenz und kann einen kompletten Organismus mit all seinen Geweben bzw. Organen bilden. Das „Ausradieren“ der Keimzell-spezifischen epigenetischen Modifizierungen im Genom wird als Reprogrammierung bezeichnet und geschieht im Zusammenspiel von DNA-Replikation und Demethylasen. Die Reprogrammierung setzt bereits in der Zygote ein und ist auf dem Zwei-Zell-Stadium abgeschlossen [1].

Nach neuesten Erkenntnissen an Mäusen werden väterliche Gene

erstmalig während der S/G2-Phase der Zygote transkribiert (Abbildung 1). Zu diesem Zeitpunkt bedingt die Zusammensetzung der Nukleosomen eine vergleichsweise lockere Packung des Chromatins, so dass eine große Bandbreite von Genen leicht für die Transkriptionsmaschinerie zugänglich ist. Diese erste Phase der zygotischen Genaktivierung (*minor zygotic gene activation*) ist nur von kurzer Dauer, denn im Zwei-Zell-Stadium ändert sich die Zusammensetzung der Nukleosomen erneut. Die dann dominierenden Histon-Varianten fördern eine dichtere Packung des Chromatins und erschweren so die Transkription. Infolgedessen erfordert die zweite Phase der zygotischen Genaktivierung (*major zygotic gene activation*) besondere Transkriptionsfaktoren, die in der Lage sind, die Chromatinstruktur lokal zu lockern und der Transkriptionsmaschinerie Zutritt zu den Promotoren zu verschaffen: die so genannten Pionierfaktoren [2]. Beim Zebrafisch und bei Fröschen scheint es sich um bekannte Faktoren zu handeln, die auch eine eingeschränkte Differenzierungsfähigkeit von Stammzellen, die Pluripotenz, aufrechterhalten. Bei Säugetieren dagegen sind die Pluripotenz-Faktoren Oct4 und Nanog nicht an der zygotischen Genaktivierung beteiligt.

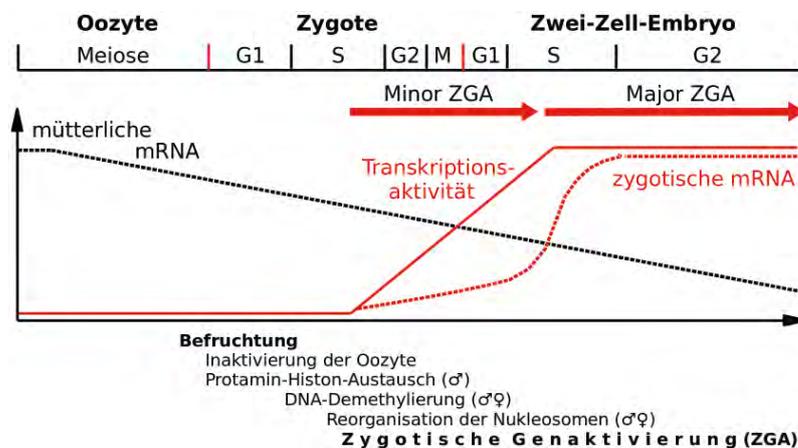


ABB. 1 Stark vereinfachtes Schema der Regulationsmechanismen, die nach der Befruchtung der Eizelle zur zygotischen Genaktivierung (ZGA) führen [1, 2]. Die zweite Phase der zygotischen Genaktivierung (Major ZGA) erfordert den Pionierfaktor Nr5a2, der an Enhancer-Elemente im Bereich der sog. *Short Interspersed Nuclear Elements* (SINE) B1 bindet und das Chromatin öffnet [3].
 Grafik: A. Hille-Rehfeld.

Retrotransposon-ähnliche Segmente ...

Pionierfaktoren bei Säugetieren zu identifizieren, war das Ziel einer Kooperation von Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Biochemie in Martinsried und vom Biozentrum in Wien [3]. Sie analysierten zunächst systematisch die Basensequenzen in der Umgebung von mehr als 2500 Genen, die spezifisch während des Zwei-Zell-Stadiums von Mausembryonen exprimiert werden. Etwa 8 kb stromaufwärts des kodierenden Bereichs fanden sie fast zweimal häufiger als bei den übrigen Genen eine Konsensus-Sequenz mit großer Ähnlichkeit (90 %) zu einer

Familie von Retrotransposons, die bei der Maus als „*Short Interspersed Nuclear Element (SINE) B1*“ bezeichnet wird und mit den Alu-Sequenzen des Menschen verwandt ist.

Im Umfeld dieser Konsensus-Sequenz war zweierlei bemerkenswert: Die Gene in der Nähe der Konsensus-Sequenz waren während der zygotischen Genaktivierung vergleichsweise leicht für die Transkriptionsmaschinerie zugänglich und der Grad der Histon-Acetylierung des Chromatins war in diesem Bereich erhöht. Weiterhin fielen innerhalb der Konsensus-Sequenz bekannte Motive auf, an die bestimmte Kernrezeptoren binden. Von diesen könnten Nr5a2 und Esrrb während der zygotischen Genaktivierung bedeutsam sein, denn bei Ausschaltung jedes einzelnen dieser Rezeptoren sterben homozygot-negative Embryonen während der Implantationsphase ab. Außerdem sind beide Rezeptoren in der mütterlichen Boten-RNA repräsentiert und als Proteine bereits während des Zwei-Zell-Stadiums nachweisbar.

Nr5a2 lässt sich durch eine Pyrimidin-haltige niedermolekulare Substanz (SR1848) hemmen. Unter Einwirkung von SR1848 konnten Embryonen keine Blastocysten bilden, sondern fragmentierten und starben wenige Tage nach der Befruchtung. Die Autoren werteten dies als ersten Hinweis darauf, dass Nr5a2 für die Etablierung von Pluripotenz bedeutsam ist.

... binden den Pionierfaktor Nr5a2

Weiterhin zogen die Wissenschaftler im Experiment durch einen Trick das Nr5a2-Protein aus dem Verkehr. Dafür injizierten sie Antikörper gegen Nr5a2 in embryonale Zellen,

zusammen mit einer an den Fc-Rezeptor gekoppelten E3-Ubiquitin-Protein-Ligase, die spezifisch das mit Antikörpern markierte Nr5a2-Protein ubiquitiniert und so dem Abbau am Proteasom zuführt. Infolgedessen verringerte sich die Menge der während der zygotischen Genaktivierung gebildeten Transkripte etwa auf die Hälfte des Kontrollwerts. Auch die Ausschaltung von Nr5a2 durch *Silencing* mittels siRNA verringerte die Transkription während der zygotischen Genaktivierung, wenngleich mit geringerer Effizienz. Das Spektrum der Gene, deren Expression Nr5a2 erfordert, repräsentierte 72 Prozent der während der zygotischen Genaktivierung gebildeten Transkripte.

An welchen Stellen im Genom der Rezeptor Nr5a2 im Zwei-Zell-Stadium bindet, ermittelten die Wissenschaftler durch Markierung des Rezeptors mit spezifischen Antikörpern, anschließende Fragmentierung der DNA und Sequenzierung der durch die Antikörper erkenntlichen Fragmente mit gebundenem Rezeptor. Dabei bestätigte sich, dass Nr5a2 tatsächlich im Bereich der oben genannten Konsensus-Sequenz bindet, und zwar bevorzugt in der Nähe des Transkriptionsstartpunkts von Genen, die während der zygotischen Genaktivierung verstärkt exprimiert werden und durch die Ausschaltung des Rezeptors betroffen sind.

Ein Abgleich mit früher publizierten Daten zum Chromatin im Zwei-Zell-Embryo zeigte, dass die Bindestellen von Nr5a2 in Regionen von offenem Chromatin liegen und als Enhancer-Elemente fungieren. Dabei handelt es sich nicht um eine bloße Koinzidenz, denn die Ausschaltung des Rezeptors Nr5a2 führte dazu, dass das Chromatin der Zwei-Zell-Embryonen weniger zugänglich für DNA-Insertionen durch

das Enzym Transposase 5 war. Die Autoren schlossen daraus, dass die Bindung von Nr5a2 eine Öffnung des Chromatins bewirkt. Reagenzglasversuche zeigten, dass die Bindung bevorzugt an der Stelle erfolgt, an der die beiden Enden des jeweils ein Nukleosom umwickelnden DNA-Fadens zusammentreffen. An dieser Stelle bindet auch der Pluripotenzfaktor Oct4. Demnach ist Nr5a2 tatsächlich als Pionierfaktor einzuordnen, der durch Öffnung des Chromatins die Genexpression erleichtert.

Auch die Bindung von Esrrb ist für die zygotische Genaktivierung bedeutsam, wie entsprechende Experimente zeigten. Allerdings bindet dieser Rezeptor neben Enhancer-Elementen auch an den Promotorbereich von Genen, während sein Einfluss auf die zygotische Genaktivierung verglichen mit dem von Nr5a2 weniger ausgeprägt erschien.

Damit wurden am Beispiel der Maus erstmals Pionierfaktoren identifiziert, die für die zygotische Genaktivierung bei Säugetieren erforderlich sind. Da Nr5a2 ein bei allen bislang untersuchten Metazoa konserviertes Protein darstellt, darf man gespannt sein, welche Funktion ihm bei anderen Organismen zukommt. Zwar sind die in der vorliegenden Publikation gefundenen Bindungsmotive spezifisch für die Maus, doch spekulieren die Autoren, ob die damit verwandten Alu-Sequenzen beim Menschen ebenfalls eine Pionierfunktion von Nr5a2 vermitteln können.

Literatur

- [1] R. Fraser, C. J. Lin (2016). *Reproduction* 152, R211–R222.
- [2] F. Aoki (2022). *J. Reprod. Dev.* 68, 79–84.
- [3] J. Gassler et al. (2022). *Science* 378, 1305–1315.

Annette Hille-Rehfeld, Stuttgart



Die Antarktis ist bekannt für ihre gigantischen Tafelberge (wie dieser im Hintergrund). Sie stammen von den Gletschern des weißen Kontinents und bestehen aus Süßwasser. Meereis hingegen ist gefrorenes Salzwasser. Es entsteht und vergeht im Wechsel der Jahreszeiten. Je nach Region kann das Meereis aber auch über Jahre bestehen und mehrere Meter dick werden.
Foto: Gritta Veit-Köhler.

Meereis bedeutet Leben am Meeresboden

Ökosystemfunktionen im Südpolarmeer

HEIKE LINK | GRITTA VEIT-KÖHLER

Die Lebewesen am Meeresboden verwerten das, was aus dem Wasser zu ihnen in die Tiefe gelangt. Sie ernähren sich vom organischen „Abfall“ und setzen Nährstoffe frei. Diese Nährstoffe wiederum dienen Algen als Dünger. So hält die Gemeinschaft am Meeresboden den ökologischen Kreislauf von Produktion und Abbau in Schwung. Den Abbau und die damit verbundenen biogeochemischen Stoffflüsse nennen wir „Remineralisierung“.

Dieser Beitrag gehört zu unserer Serie über Forschungsprojekte aus dem DFG-Schwerpunktprogramm 1158 „Antarktisforschung“.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 146 erklärt.

Ökosystemfunktionen sind Prozesse und Wechselwirkungen in einem Ökosystem, die von Produzenten, Konsumenten und Destruenten angetrieben werden. Diese Kategorien umfassen alle Lebensformen: phototrophe Mikroorganismen und Pflanzen, heterotrophe Mikroorganismen und Tiere sowie Pilze. Alle diese Organismen nutzen und verbrauchen organische und anorganische Substanzen auf verschiedene Weisen, bauen sie in ihre Körper ein und geben sie in anderer Form wieder an die Umgebung ab. Daher sind Ökosystemfunktionen abhängig von der Vielfalt der Lebensgemeinschaften in einem Lebensraum [1]. Ökosystemfunktionen wiederum sind die Grundlage für Ökosystemleistungen, von denen wir alle profitieren und auf die wir als Menschheit angewiesen sind [2]. So liegen für uns Leistung und Nutzen der Meere in der Produktion von Sauerstoff und der Aufnahme und Speicherung von Kohlendioxid. Wir können aus den

Meeren Lebensmittel gewinnen, und biogene Strukturen wie Riffe und Mangrovenwälder dienen dem Küstenschutz. Nicht zuletzt haben Meere für uns einen großen Erholungswert. Angesichts der globalen Umwälzungen verändern sich aber auch die Ökosystemleistungen weltweit. Daher müssen wir die Rolle der biologischen Vielfalt für Ökosystemfunktionen verstehen, den Einfluss von Veränderungen der Lebensgemeinschaften untersuchen [3] und die Biodiversität bewahren. Polare Ökosysteme sind dabei von besonderem Interesse, da sie sich durch den Klimawandel schneller und stärker verändern als die Ökosysteme in anderen Regionen [4–6]. Nicht zuletzt bietet neben dem Kampf gegen die Klimaerwärmung die Einrichtung von Meeresschutzgebieten die große Chance, Lebensgemeinschaften, ihre Funktionen und damit den Nutzen, den sie für uns haben, langfristig zu schützen.

Mit dem Meereis fängt alles an

Weitläufig bekannt ist, dass das Meereis eine wichtige Funktion für fast alle großen Tiere in der Antarktis hat: Der Antarktische Krill lebt und frisst unter dem Meereis und bildet mit seiner immensen Biomasse die Nahrungsgrundlage für Wale, viele Robben und Seevögel, vor allem Pinguine. Aber auch die Fauna des Meeresbodens der Antarktis braucht Nahrung. Tiere, die in lichtarmen tieferen Regionen leben, sind auf organisches Material „von oben“ angewiesen. Pflanzliches und tierisches sinkt auf den Grund: Algen, tote Tiere, Kotballen. Oft wird dieser „Abfall“ auf dem Weg in die Tiefe mehrfach genutzt, gefressen und zersetzt. Die Grundlage der Nahrungsnetze im Südozean sind größtenteils Mikroalgen. Sie leben als Phytoplankton im freien Wasser [7] oder sind Eisalgen, die das Meereis als Lebensraum nutzen (Abbildung 1).

Die Primärproduktion, die von den Mikroalgen geleistet wird, hängt in zweifacher Hinsicht von der Eisbedeckung ab. Zum einen sind es die Eisalgen selbst, die sich ansiedeln und vermehren können, solange das Meereis existiert. Von ihnen ernähren sich tierische Gemeinschaften, die sich im und direkt unter dem Meereis entfalten. Schmilzt das Meereis, verschwindet ihr Lebensraum, und es sinken nicht nur die Eisalgen zu Boden, sondern auch die Überreste der Tiere und ihre Exkremente. Zum anderen bildet das abschmelzende Meereis die Grundlage für die Vermehrung der Mikroalgen im freien Wasser (Phytoplankton). Da bei der Entstehung des Meereises hochkonzentriertes Salzwasser durch Solekanälchen abfließt, ist das Meereis selbst weniger salzhaltig als das umgebende Meerwasser. Schmilzt es, so bildet das leichtere, „süßere“ Schmelzwasser eine Deckschicht auf dem Meer. Dadurch entsteht eine stabile Schichtung in der Wassersäule, die eine Algenblüte ermöglicht.

Der Grad und die Variabilität der Eisbedeckung wirken sich also direkt auf die Lebewesen am Meeresboden aus [8]. Wenn weniger oder gar kein Meereis entsteht, dann fehlen die Eisalgen als Nahrungsquelle und es kommt im turbulenten Südozean seltener zu einer stabilen Schichtung. Dadurch treten auch ausgedehnte Algenblüten im freien Wasser seltener auf. Auch die entgegengesetzte Situation ist für die Lebewesen am Meeresboden nicht vorteilhaft: In manchen Gebieten der Antarktis schmilzt das Meereis über mehrere Jahre überhaupt nicht [9]. Dann werden keine Eisalgen freigesetzt und für eine nennenswerte Blüte von Mikroalgen im freien Wasser fehlt das Licht. In beiden Fällen kommt es am Meeresboden zu einem Mangel an Nahrung und die Fauna muss abwarten, bis wieder etwas von oben kommt. Das kann plötzlich und unerwartet passieren. Das Meereis reißt auf, eine ► Phytoplanktonblüte entwickelt sich innerhalb kurzer Zeit und vergeht wieder, die Mikroalgen verklumpen und sinken zusammen mit abgestorbenen Organismen und ihren Kotballen in die Tiefe (Abbildung 2, siehe Phase 1).



ABB. 1 Eisalgen leben an der Unterseite und in den Solekanälchen des Meereises. Die Schollen auf dem Foto wurden von der POLARSTERN bei der Fahrt durch das Packeis umgedreht. Dadurch ist die von den Eisalgen braun-gelblich gefärbte Unterseite sichtbar. Schmilzt das Meereis, bedeutet das Nahrung für die Tiere am Meeresboden. Foto: Gritta Veit-Köhler.

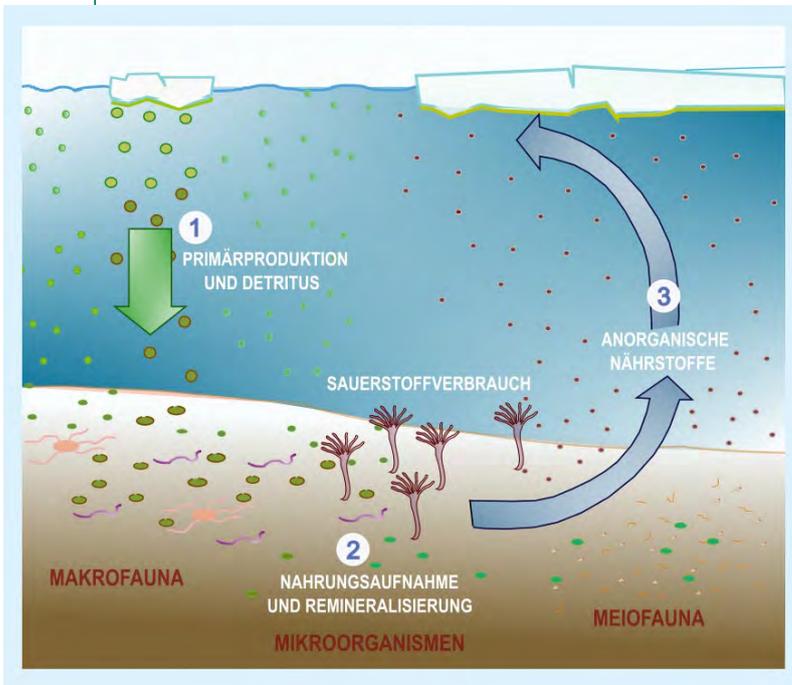
Was passiert am Meeresboden?

Der Nahrungsregen von oben bringt die Fauna auf Trab: Sauerstoffmessungen direkt am Meeresboden zeigen, dass die verfügbare Nahrung sehr schnell gefunden, gefressen und umgesetzt wird [10]. Die Makrofauna ist schon durch ihre Körpergröße auffällig (> 0,5 mm; Definition und Lebensweise siehe [11]), und ihre Vertreter verbrauchen rasch einiges an Sauerstoff, wenn sie Nahrung in Energie umwandeln ([12] Abbildung 2, siehe Phase 2). Auch die zahlenmäßig weit überlegene Meiofauna (Tiere mit einer

IN KÜRZE

- **Ökosystemfunktionen** sind Prozesse und Wechselwirkungen in einem Ökosystem. Sie **sind abhängig von den Umweltbedingungen und den Lebewesen**, die in einem Ökosystem vorkommen.
- Das **Meereis beeinflusst die Primärproduktion im freien Wasser und beheimatet Eisalgen**, die zusätzliche Nahrung für die Tiere am Meeresboden sind, wenn das Meereis schmilzt.
- Die **Lebewesen am dunklen Meeresboden leben von allem, was von oben herunterrieselt: einzellige Algen, tote Tiere, Kotballen.**
- **Im Labor können Nahrungspulse simuliert und die Reaktion der Lebewesen im Sediment untersucht werden.**
- **Gemeinschaften am Meeresboden verbrauchen Sauerstoff in Abhängigkeit von der Futtermenge**, die ihnen zur Verfügung steht. Sie scheiden **Endprodukte** aus, die **neuer Dünger** für die Nahrungskreisläufe sind.
- Die Zusammensetzung der **Gemeinschaften am Meeresboden ist abhängig von der Eisbedeckung an der Oberfläche**. Klimaveränderungen beeinflussen regionale Gegebenheiten.

ABB. 2 | NAHRUNGS- UND NÄHRSTOFFKREISLAUF ZWISCHEN EIS UND MEERESBODEN



Primärproduktion und Detritus (1): Eisalgen und Phytoplankton sind Primärproduzenten im Südozean. Zusammen mit toten Tieren und Kotballen sinken sie zum Meeresboden. **Nahrungsaufnahme und Remineralisierung (2):** Heterotrophe Mikroorganismen, Pilze und Tiere der Meiofauna (z. B. Fadenwürmer, Ruderfußkrebse) und Makrofauna (z. B. Borsten- und Röhrenwürmer, Schlangensterne) zersetzen die Nahrung und verbrauchen Sauerstoff. **Anorganische Nährstoffe (3):** Bei der Remineralisierung werden anorganische Nährstoffe (Mineralstoffe) wie Ammonium, Nitrat, Phosphat und Kieselsäure als Nebenprodukte freigesetzt. Diese dienen als Dünger für die Primärproduktion an der Oberfläche. Grafik (erstellt mit Inkscape 1.1): Gritta Veit-Köhler.



ABB. 3 Bis wir mit dem Forschungseisbrecher POLARSTERN im Packeis und somit in ruhigen Gewässern angekommen sind, müssen wir die Westwindzone der „Roaring Forties“ und „Furious Fifties“ zwischen 40 und 60 Grad südlicher Breite durchqueren. Wellen von bis zu 8 Metern Höhe sind dort keine Seltenheit. Foto: Gritta Veit-Köhler.

Körpergröße von 0,32 bis 0,5 mm, s. [11]) reagiert: Die Tiere bewegen sich durch das Sediment nach oben zur Nahrung und viele sind nach einem Algenregen näher an der Sedimentoberfläche zu finden als vorher [13]. Jeder ► Nahrungspuls kurbelt den Stoffwechsel der Fauna am Meeresboden an. Auch wenn sie nicht sofort mit einer deutlichen Erhöhung ihrer Biomasse durch Wachstum oder Reproduktion reagieren [12, 13], so können sie doch Reserven anlegen und die Voraussetzungen für den Fortbestand des Lebens schaffen. Mikroorganismen wie Bakterien, andere Einzeller und Pilze sind ebenfalls größtenteils abhängig von dem, was von oben kommt.

Aber das ist nur ein Teil der Geschichte. Man könnte den Meeresboden auch als die Kompostierungsanlage des Meeres bezeichnen. Die Organismen verwerten „Abfall“, aber sie erzeugen damit nicht nur Energie und Biomasse und verbrauchen Sauerstoff. Beim Zerlegen der Nahrung scheiden Tiere und Mikroorganismen Stoffwechselprodukte aus, die wichtige wiederverwendbare „Rohstoffe“ sind [14, 15]. Diesen Vorgang nennen wir Remineralisierung. Anorganische Nährstoffe wie Ammonium, Nitrat, Phosphat und Kieselsäure fungieren wie der Dünger, den wir in Form von Kompost auf unsere Gartenbeete streuen. Und hier schließt sich der Kreis, denn diese Nährstoffe sind die Grundlage für die Primärproduktion der Mikroalgen weit oben im freien Wasser und im Meereis (Abbildung 2, siehe Phase 3).

Wir gehen auf Expedition

Je nach geplantem Expeditionsverlauf sticht der Forschungseisbrecher FS POLARSTERN von Kapstadt (Südafrika) oder von Punta Arenas (Chile) Richtung Süden ins Meer (Abbildung 3). An Bord sind neben der Besatzung knapp 50 Wissenschaftler/-innen aus verschiedenen Nationen mit ganz unterschiedlichen Fragestellungen und Fachrichtungen von Meteorologie über Ozeanographie und Geologie bis zur Biologie. Im Frachtraum transportiert die POLARSTERN das Arbeitsmaterial, fachgerecht und sicher in Aluminiumkisten verpackt, durch den Zoll gebracht und bereits Monate vor Abfahrt am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven abgegeben. In Containern verstaut warten Probengefäße, Messtechnik, Filtersysteme und Laborbedarf auf ihren Einsatz.

Ziel unserer drei Expeditionen war das Weddellmeer, das größte der Randmeere, die den antarktischen Kontinent umschließen (Abbildung 4). In mehreren Gebieten des nordwestlichen und des südöstlichen Weddellmeeres wollten wir in unserem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt untersuchen, wie sich die Dauer der Meereisbedeckung auf die Zusammensetzung der Gemeinschaften am Meeresboden auswirkt und wie diese wiederum die Ökosystemfunktionen bestimmen. Dazu haben wir Sedimentproben vom Meeresboden genommen (Abbildung 5) und in Kühlcontainern an Bord der POLARSTERN ökologische Experimente durchgeführt.

Vom Meeresboden ins Kühllabor

Weil die meisten der kleineren Tiere im obersten Zentimeter des Sedimentes leben, wird an Bord der POLARSTERN der Multicorer (MUC) eingesetzt, der Proben vom Meeresboden mit ungestörter Sedimentoberfläche sammeln kann (Abbildung 5). Dieses Gerät ist je nach Version mit acht oder mehr Polycarbonatrohren ausgestattet, die nach der Landung auf dem Meeresboden langsam in das Sediment gedrückt werden. Wird der MUC angehoben, schließen Deckel die sedimentgefüllten Rohre oben und unten ab. Dann wird das Gerät mit der Winde wieder an Deck gehievt und die Stechrohre werden entnommen und ins Kühllabor gebracht.

Einige der Fragen, die wir uns über die Remineralisierung am antarktischen Meeresboden stellen, können wir bereits an Bord beantworten (siehe unten). Im dunklen Kühlcontainer verschließen wir die MUC-Rohre mit luftdichten Deckeln und „inkubieren“ sie bei 0 bis +2 Grad Celsius. So können wir den Sauerstoffverbrauch der Organismen im Sediment verfolgen. Außerdem nehmen wir regelmäßig Wasserproben für die Nährstoffanalyse, wobei sehr sauber gearbeitet werden muss, um Kontaminationen zu vermeiden. Am Ende wird das gesamte Sediment in horizontale Scheiben geschnitten, fixiert und mitsamt der Fauna ins heimische Labor mitgenommen (Abbildung 6).

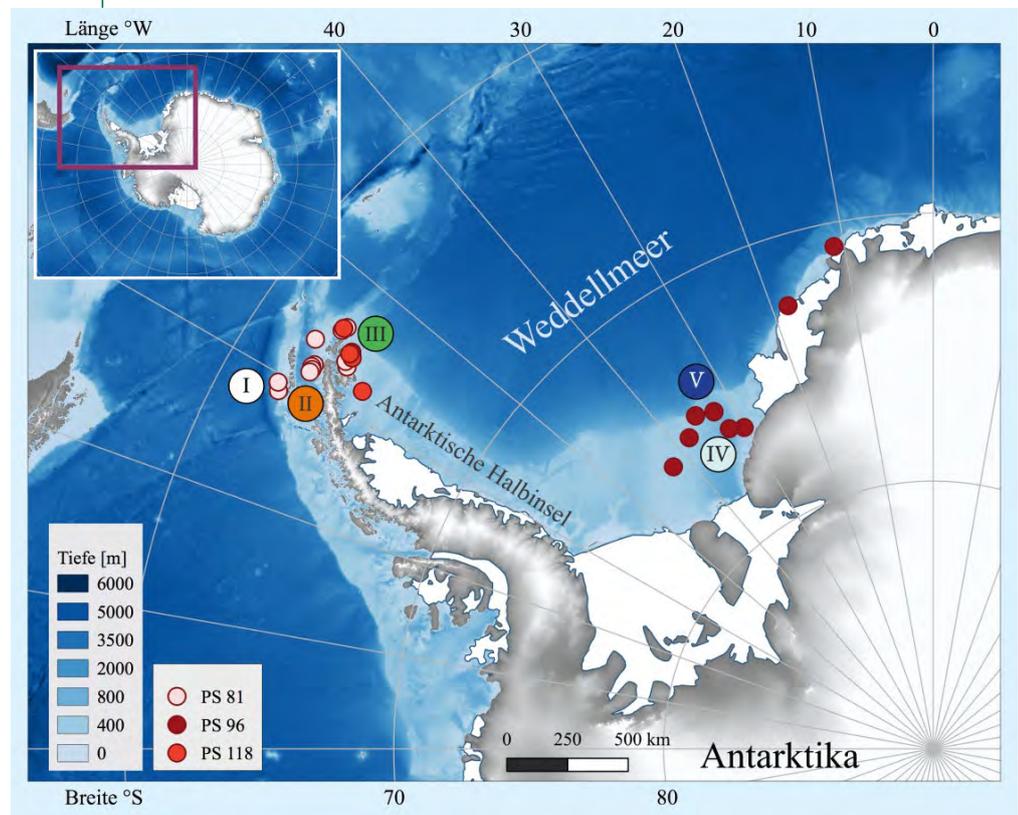
Nahrung bedeutet Atmung

In den luftdicht verschlossenen Inkubationsrohren verarbeiten die Tiere im Sediment weiter die Nahrung, die auf dem ausgestochenen Stück Meeresboden liegt, nur dass wir nun kontrollieren, was passiert: Alle vier Stunden wird die Sauerstoffkonzentration und die Temperatur gemessen, um später den Sauerstoffverbrauch in den Systemen zu berechnen. Die Sauerstoffmessungen werden mit einem optischen Messverfahren durchgeführt, bei dem die Röhren nicht geöffnet werden müssen. Wir gehen aber noch einen Schritt weiter und simulieren in einigen der Inkubationsrohre einen Nahrungspuls, einen „Regen“ von organischem Material, gerade so als ob das Meereis Eisalgen freigesetzt oder in der Wassersäule eine Phytoplanktonblüte stattgefunden hätte. Dazu geben wir zuvor im Labor kultivierte und gefriergetrocknete Mikroalgen in die

Rohre – und das in einer Menge, die auch unter natürlichen Umständen auf die Sedimentoberfläche treffen könnte. Am „Meeresboden“ ist man vorbereitet und die Reaktion folgt auf den Fuß: Die Organismen veratmen bei Nahrungszugabe den vorhandenen Sauerstoff deutlich schneller als in den Kontrollproben ohne zusätzliche Algen. Es wird gefressen, und das ohne eine nennenswerte Anlaufphase (Abbildung 7).

Um die Unterschiede und die Variabilität des Sauerstoffverbrauches zwischen einzelnen Inkubationsrohren bestimmen zu können, werden nicht die absoluten Sauerstoffmengen verglichen, sondern die Steigungen (hier eigentlich die „Gefälle“, also die negativen Steigungen) der Geraden, die durch die einzelnen Messpunkte gelegt werden. So kann man sehen, dass der Sauerstoffverbrauch bei Algenzugabe höher ist (Abbildung 7, grüne Geraden zeigen schnellere Abnahme) als bei den Kontrollinkubationen ohne Algenzugabe (blaue Geraden haben ein geringeres Gefälle). Generell wird die Verschiebung (Aufnahme,

ABB. 4 | UNTERSUCHTE STATIONEN IM WEDDELLMEER



Auf den drei POLARSTERN-Expeditionen PS 81 (2013), PS 96 (2016) und PS 118 (2019) konnten wir an einer Vielzahl von Stationen (farbige Kreise) die Aktivitäten der Bewohner des Meeresbodens erforschen. Dazu gehörten Gebiete mit gar keiner bis geringer Eisbedeckung (I, Drake Passage; II, Bransfieldstraße), mit saisonal variierender Eisbedeckung (III, Nordwestliches Weddellmeer) und mit sehr ausgeprägter und teilweise dauerhafter Eisbedeckung (IV+V, Südöstliches Weddellmeer). Die Farben der Kategorien I-V finden sich in den Ergebnissen wieder, die in Abbildung 10 dargestellt werden. Das rote Rechteck (oben links) zeigt den gewählten Ausschnitt der Detailkarte an. Die Karte wurde mit dem Programm QGIS und Daten von GEBCO und naturalearthdata.com erstellt. Karte: Leon Hoffman.

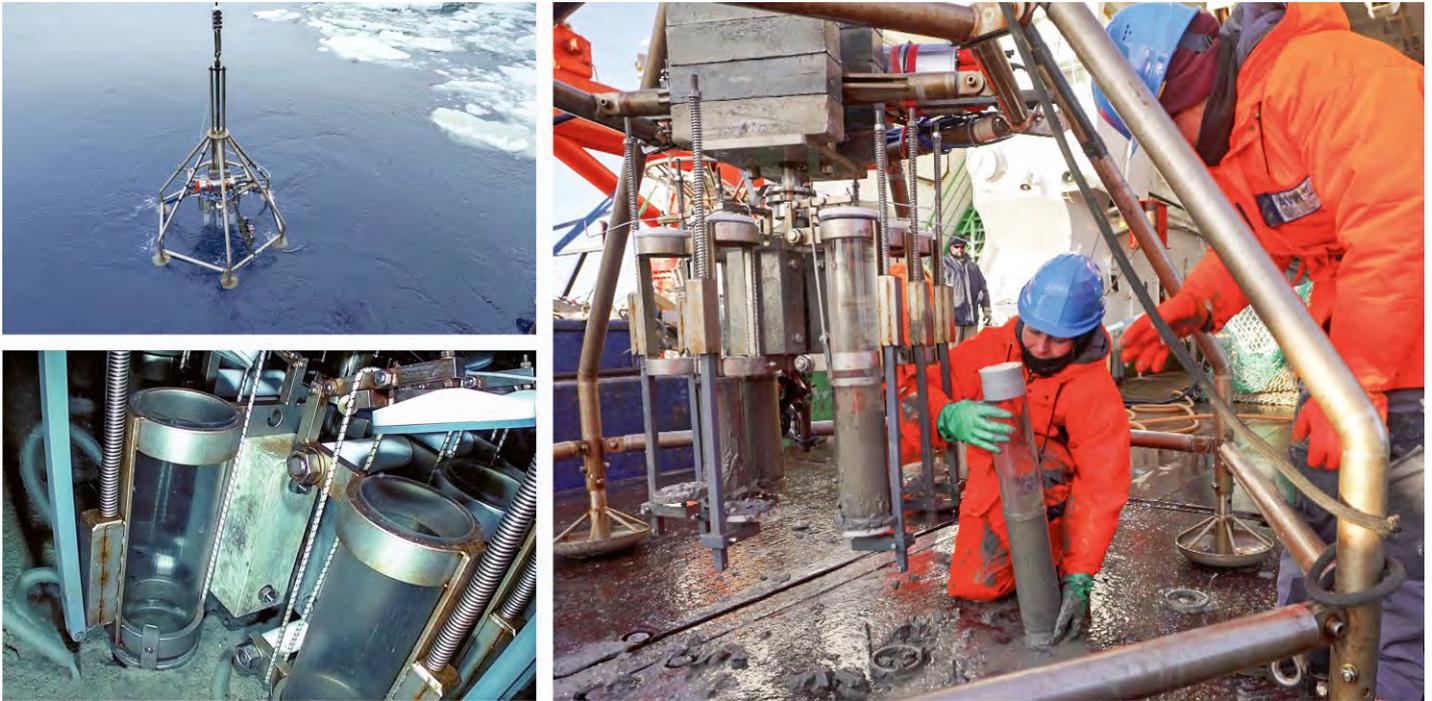


ABB. 5 Der Multicorer (MUC) ist ein Gerät, mit dem Proben vom Meeresboden genommen werden. Wenn der MUC auf dem Grund landet, werden seine Stechrohre langsam ins Sediment gedrückt. Beim Anheben werden sie automatisch zuerst oben und dann unten verschlossen. An Bord werden die Proben entnommen und direkt ins Labor gebracht. Fotos: Gritta Veit-Köhler (o. l., r.), AWI, SENCKENBERG, Universität Kiel (u. l.).



Umbau, Abgabe) von chemischen Verbindungen an der Grenzschicht von Sediment und Wasser ► „Flux“ (Durchfluss) genannt. Und die Sauerstofffluxe variieren nicht nur zwischen einzelnen Proben von einem Standort, sondern sie unterscheiden sich noch deutlicher zwischen Inkubationen, die wir an unterschiedlichen Stationen im Weddellmeer durchgeführt haben (Abbildung 4). Das hängt wiederum mit den Tiergemeinschaften (s. u. „Ein Blick in die Röhre“) und den Umweltvoraussetzungen zusammen, die sich je nach Eisbedeckung in den von uns verglichenen Regionen deutlich unterscheiden.

Remineralisierung als Grundlage für die Produktion

Bei vielen ökologischen Studien wird der Sauerstoffverbrauch nicht einbezogen. Die Messungen sind zu aufwändig. Noch seltener werden Fluxe von Nährstoffen untersucht.

ABB. 6 Die Arbeiten im +2 Grad Celsius kalten Laborcontainer an Bord sind vielfältig: Die MUC-Rohre sind luftdicht verschlossen (u. l.). In den Deckeln sind kleine Motoren eingebaut, die mit Magnetrührern das Wasser über dem Sediment vorsichtig verwirbeln, damit der vorhandene Sauerstoff gleichmäßig verteilt wird. Regelmäßig werden Wasserproben für die Nährstoffanalyse entnommen (o. l.) und die Temperatur gemessen (o. r.). Am Ende werden die Rohre geöffnet, Unterproben des Sediments für Pigmentanalysen gezogen (u. r.) und der gesamte Kern in Scheiben geschnitten und fixiert. Fotos: Gritta Veit-Köhler.

Um sie zu messen, müssen Wasserproben entnommen werden. Dazu wird ein kleines, ansonsten verschlossenes Loch im Deckel der Inkubationsrohre geöffnet, eine Wasserprobe entnommen und dieselbe Menge Meerwasser wieder aufgefüllt. Nährstoffe sind empfindliche, oft reaktive Moleküle, die aber auch weit verbreitet sind. Daher ist die Handhabung der Proben an Bord schwierig: Weil besonders sauber gearbeitet werden muss, werden die Spritzen vor ihrem Gebrauch mit Säure gewaschen. Damit es nicht zu weiteren Umsetzungsprozessen kommt, müssen die Proben bei -80°C gelagert und bei dieser Temperatur auch bis ins Institut nach Hause transportiert werden. Die Analyse von Ammonium (NH_4^+) ist besonders kompliziert, da es besonders schnell abgebaut wird und die Proben jederzeit kontaminiert werden könnten. Also muss dieser Nährstoff direkt an Bord gemessen werden.

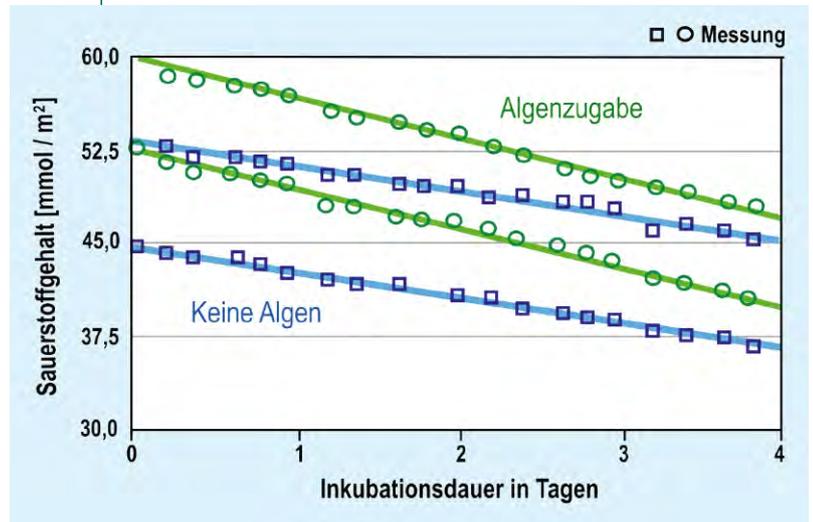
Ammonium ist ein Abbauprodukt des Proteinstoffwechsels und wird von Bakterien über Nitrit (NO_2^-) zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert. Insbesondere Nitrat ist ein wichtiger Stickstofflieferant für die Primärproduktion. Stickstoff (N) ist in allen Aminosäuren, den Bausteinen der Proteine, als sogenannte Amino-Gruppe ($-\text{NH}_2$) sowie in den Nucleinsäuren der Erbsubstanz enthalten. Einmal durch Auftrieb vom Meeresboden ins antarktische Oberflächenwasser gelangt (Abbildung 2: Phase 3), wird Nitrat schnell von den Mikroalgen genutzt und während des nordwärts gerichteten Strömungstransports im Weddellmeer verbraucht. So gibt es in den verschiedenen Regionen der Antarktis unterschiedliche Konzentrationen von Nitrat im oberflächennahen Wasser [16]. Der Nährstoff Phosphat (PO_4^{3-}) liefert unter anderem die Bestandteile des Adenosintriphosphats (ATP), das der universelle Energieträger in den Zellen aller Organismen ist. Die Kieselsäure ($\text{Si}(\text{OH})_4$) wiederum bildet den Hauptbestandteil der strukturbildenden, siliziumhaltigen Gerüstmoleküle der als Primärproduzenten wichtigen Kieselalgen (Diatomeen), aber auch von Strahlentierchen (Radiolarien) und Glasschwämmen (Hexactinellida).

Mit der Analyse der Nährstoffe können wir die Effektivität und die Remineralisierungsraten von verschiedenen **Benthosgemeinschaften** beurteilen. Die Ökosystemfunktionen des Weichbodens und seiner Gemeinschaften unterscheiden sich zwischen den von uns untersuchten Stationen und Regionen. Die Vielfalt der Arten, die Anzahl der Individuen und ihre Funktion im Ökosystem Meeresboden sind wichtige Faktoren für den Sauerstoffverbrauch und die Nährstoffflüsse an der Sediment-Wasser-Grenzfläche [15, 17].

Ein Blick in die Röhre

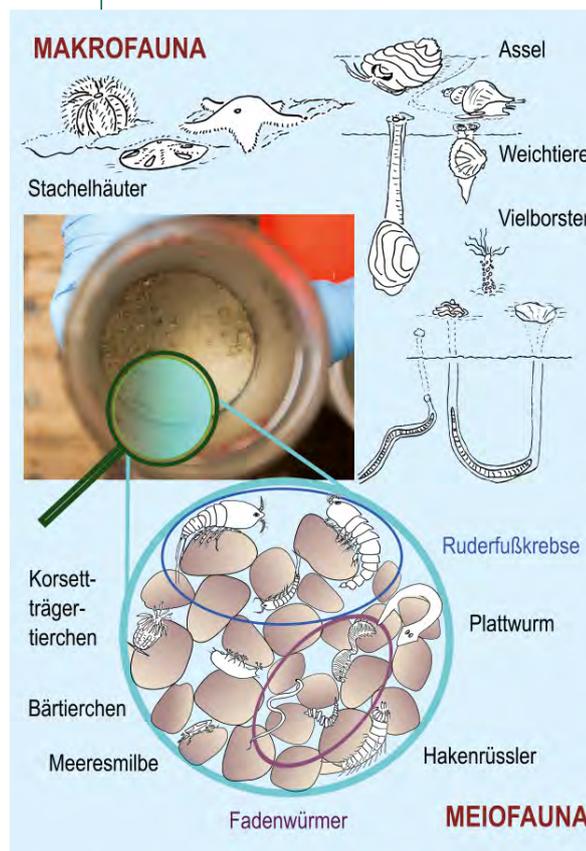
Welche Organismen besiedeln nun die Weichböden der Antarktis und sorgen für die Remineralisierung? Neben den Mikroorganismen leben im und auf dem Sediment hauptsächlich Tiere, die zu zwei Größenklassen gehören, nämlich der Meiofauna und der Makrofauna (Abbildung 8). Zur Makrofauna gehören Stachelhäuter (Echinodermata)

ABB. 7 SAUERSTOFFVERBRAUCH VON BENTHONISCHEN GEMEINSCHAFTEN



Während der mehrtägigen Inkubation im Kühlcontainer nimmt der Sauerstoffgehalt des Wassers in den sedimentgefüllten MUC-Rohren stetig ab, weil die im Sediment lebenden Organismen fressen und dabei Sauerstoff verbrauchen. Um einen Nahrungspuls aus dem freien Wasser zu simulieren, geben wir zusätzlich Mikroalgen in einige der Inkubationsrohre. In diesen Rohren nimmt der Sauerstoffgehalt im Wasser schneller ab (grüne Geraden) als in den Kontrollproben (blaue Geraden). Grafik (erstellt mit Inkscape 1.1): Gritta Veit-Köhler.

ABB. 8 MAKROFAUNA UND MEIOFAUNA IM SEDIMENT



Auf den ersten Blick ist im MUC-Rohr wenig zu sehen. Aber das Leben tobt im Sediment: Makrofauna ist mit einer Körperlänge ab 0,5 cm nicht unbedingt „groß“ und Meiofauna verbirgt sich ohnehin größtenteils in den oberen Zentimetern des Sediments. Grafik (erstellt mit Inkscape 1.1): Gritta Veit-Köhler.

wie Seeigel, Seegurken, Seesterne und Schlangensterne, die auf oder dicht unter der Sedimentoberfläche leben. Wie die Krebstiere (Crustacea: Asseln, Flohkrebse, Schenasseln) sind sie frei beweglich. Viele Muscheln leben eingegraben im Sediment, während die meisten Schnecken auf dem Meeresboden herumkriechen (Weichtiere: Mollusca). Aber die weitaus häufigsten Tiere der Makrofauna sind Annelida (Ringelwürmer) mit ihren Untergruppen Vielborster (Polychaeta) und Wenigborster (Oligochaeta). Von räuberischen, frei lebenden Arten bis zu fest-sitzenden Formen, die Röhren im oder auf dem Sediment bauen und sich von Detritus (totem organischen Material) ernähren, ist alles dabei. Die Meiofauna wird dominiert von Fadenwürmern (Nematoda), gefolgt von Ruderfußkrebse (Copepoda), Hakenrüsslern (Kinorhyncha) und Muschelkrebse (Ostracoda). Sie alle leben auf oder im Sediment und auch hier gibt es von räuberischen Formen bis zu Resteverwertern alle Varianten, die die Nahrungsökologie zu bieten hat.

Es ist schon länger bekannt, dass sich Makrofauna- und Meiofaunagemeinschaften in der Antarktis je nach Eisbedeckung unterscheiden und verändern [11, 18, 19] und jeweils für sich eine wichtige Rolle bei der Remineralisierung von organischem Material spielen [20]. Bislang existierten aber keine Studien, in denen Tiere beider Größenklassen (Meio- und Makrofauna) gemeinsam untersucht wurden. Ebenso wenig ist bekannt, welchen Anteil Tiere

unterschiedlicher Körpergröße an den Ökosystemleistungen der Weichböden der Antarktis haben. Das wollten wir ändern.

Für derart umfangreiche Studien werden auch schon einmal eine halbe Million Tiere bestimmt und gezählt (Abbildung 9). Unsere Analysen haben ergeben, dass Meiofauna- und Makrofaunagemeinschaften sich zwischen Gebieten mit unterschiedlichen Meereisbedeckungen unterscheiden (Abbildung 10). Gemeinschaften aus Regionen mit geringer Eisbedeckung (Abbildungen 4, 10; Regionen I und II) und aus Gebieten mit fast dauerhafter Eisbedeckung (IV, V) ähneln sich, während Gemeinschaften mit sehr hohen Individuenzahlen nur in Regionen mit stark schwankenden Eisbedeckungsmustern (III) zu finden sind [21]. Das hängt damit zusammen, dass durch das regelmäßige Öffnen und Schließen der Eisdecke die besten Voraussetzungen für eine hohe Nahrungsverfügbarkeit am Meeresboden geschaffen werden. Die mittlere Eisbedeckung in den Sommermonaten – gerechnet über ein oder mehrere Jahre – spielt eine wichtige Rolle für die Ausprägung der Gemeinschaften. Für die Meiofauna ist neben der Eisbedeckung im vorangegangenen Sommer auch die langfristige Eisentwicklung über mehrere Jahre wichtig. Die Struktur der Makrofaunagemeinschaften wird neben der Nahrungssituation lediglich von der Dauer der Eisbedeckung im vorangegangenen Sommer beeinflusst [21].

Aber ganz so einfach ist die Rechnung dann doch nicht. Meiofauna- und Makrofaunagemeinschaften werden von vielen weiteren Umweltparametern unterschiedlich beeinflusst. Während die einen Tiere vor allem frisches organisches Material bevorzugen (gemessen als die Konzentration der Pigmente, die von Mikroalgen gebildet werden, wie Chlorophyll und seine Abbauprodukte), kommt es anderen Gruppen nur auf die Menge des Futters am Meeresboden an (gemessen als Gesamtmenge des organisch gebundenen Kohlenstoffs im Sediment). Und neben der Struktur und Korngröße des Sediments, die für Tiere, die am und im Meeresboden leben, immer sehr wichtige Faktoren sind, spielt auch die Wassertemperatur eine Rolle bei der Ausprägung der Gemeinschaften.

Regionale Unterschiede geben Hinweise

Was passieren kann, wenn sich durch den Klimawandel das Leben am Meeresboden verändert, kann anhand der geographisch weit voneinander ent-



ABB. 9 Am Stereomikroskop eröffnet sich die Welt der Tiere, die im Sediment leben: Der Technische Assistent Marco Bruhn sortiert eine Probe in der hauptsächlich Flohkrebse, Vielborster und Fadenwürmer vorkommen (o. l.). Für spätere detaillierte Analysen werden die Ruderfußkrebse auf einen Hohlsliffobjektträger überführt (u. l.). Fotos: Viola Siegler (o. l., r.), Gritta Veit-Köhler (u. l.).

fernten Regionen unserer Untersuchungen abgeschätzt werden. Sie stehen unter dem Einfluss von unterschiedlichen klimatischen und ozeanografischen Gegebenheiten (Abbildung 4). Was aber, wenn sich Wassertemperatur und Eisbedeckung im Zuge des Klimawandels verändern?

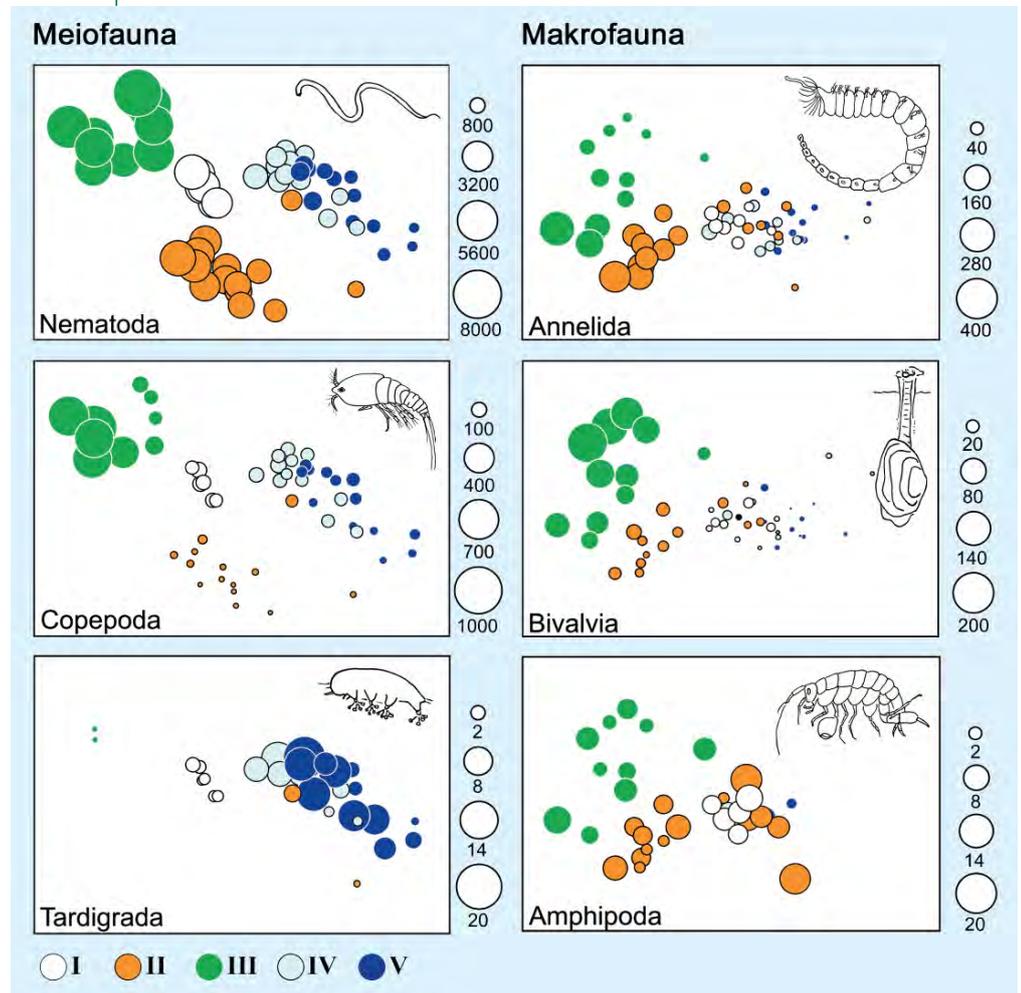
So finden wir im nordwestlichen Weddellmeer sogenannte **Food Banks**, das sind Ansammlungen großer Mengen von Nahrung am Meeresboden, die von regelmäßigen Nahrungspulsen gespeist werden und durch das regelmäßige Öffnen und Schließen des Meereises konstant hoch bleiben. Für die dort massenhaft vorkommenden Organismen bedeuten sie das Überleben während des dunklen Winters und in Jahren, in denen das Meereis mal nicht auftaut [19, 21, 22]. Einmal angenommen, in dieser Region fällt diese Regelmäßigkeit aufgrund von Temperaturerhöhungen weg und es entsteht nur noch alle paar Jahre eine geschlossene Eisdecke – es könnte sich eine Situation wie in der Bransfieldstraße einstellen (Abbildungen 4, 10): weniger Nahrung, niedrigere Tierzahlen, geringere Diversität, reduzierte Ökosystemleistungen.

Allerdings sagen Studien aus, dass Veränderungen in der Zusammensetzung der Makrofaunagemeinschaften am Meeresboden oft erst nach mehreren Jahren oder Jahrzehnten beobachtet werden [23]. Klimabedingte Umweltveränderungen führen also schleichend zu einer zeitlichen und räumlichen Variabilität der taxonomischen Diversität (Zusammensetzung und Anzahl der Arten) und der funktionellen Diversität (Übernahme verschiedener Rollen durch Lebewesen im Ökosystem) und somit der Ökosystemfunktionen. Umso wichtiger wäre es, bereits jetzt die Artenzusammensetzung und Ökosystemfunktionen des Meeresbodens regelmäßig in einem Gebiet zu beobachten, wo wir in Zukunft Veränderungen durch den Einfluss des Klimawandels erwarten [24].

Ökologie geht nur im Team

Natürlich kann man all diese Expeditionen und Untersuchungen nicht alleine schaffen, und so sind oft Technische Assistent/-innen und immer Student/-innen mit im Team,

ABB. 10 | TIERGEMEINSCHAFTEN IN DEN UNTERSUCHUNGSGEBIETEN



Meiofaunagemeinschaften (linke Spalte) und Makrofaunagemeinschaften (rechts) aus den Untersuchungsgebieten I–V, die sich in ihren Eisbedeckungsmustern unterscheiden (geografische Lage I–V siehe Abbildung 4). Jeder Punkt in diesen multidimensionalen Skalierungen (MDS) entspricht einer Probe und somit ihrer Gemeinschaft von Tiergruppen und Individuenzahlen. Der Abstand der Punkte zeigt die Ähnlichkeit zwischen den Proben auf: je näher desto ähnlicher. Meiofaunagemeinschaften unterschiedlicher Gebiete sind deutlicher voneinander abgegrenzt als Makrofaunagemeinschaften, bei denen sich die Proben verschiedener Gebiete ähnlicher sind. Die Größe der Punkte (Bubbles) entspricht der Anzahl von Individuen der jeweils dargestellten Gruppe (Skala rechts neben den Grafiken: Meiofauna – Individuen pro 10 cm²; Makrofauna – Individuen pro 100 cm²). Gezeigte Tiergruppen: Meiofauna – Nematoda (Fadenwürmer), Copepoda (Ruderfußkrebse), Tardigrada (Bärtierchen); Makrofauna – Annelida (Ringelwürmer), Bivalvia (Muscheln), Amphipoda (Flohkrebse). Kombination von Teilen der Abbildungen 5 und 6 in [21], Creative Commons by Attribution (CC-BY) 4.0 licence.

die die Proben an Bord und auch im heimischen Labor weiterbearbeiten, chemische Analysen durchführen, Tiere bestimmen und statistische Auswertungen machen (Abbildung 11). Mit den Ergebnissen schreiben Studierende dann ihre wissenschaftlichen Abschlussarbeiten. Unsere drei Expeditionen waren die Basis für insgesamt vier Praxismodule, sechs Bachelorarbeiten, drei Masterarbeiten und eine Doktorarbeit. Auch die Betreuung junger Wissenschaftler/-innen gehört zur Arbeit von Forscher/-innen. Es ist ein wichtiger Beitrag zu deren Ausbildung und die Basis gemeinsamer wissenschaftlicher Publikationen.



ABB. 11 Erst die Arbeit, dann die Belohnung: Geräteeinsätze an Bord sind körperlich anstrengend, gerade bei den Witterungsbedingungen in der Antarktis. Wenn die POLARSTERN dann während einer zweimonatigen Expedition einmal am Schelfeis festmacht, um die Neumayer-Station III auf dem antarktischen Kontinent zu versorgen, können auch die Wissenschaftler/-innen von Bord gehen (v. l. n. r.: Friederike Säring, Ben Behrend, Yasemin Bodur, Derya Seifert, Heike Link, Gritta Veit-Köhler). Fotos: Gritta Veit-Köhler (l.), Dieter Piepenburg (r.).

Für ihren Einsatz für das DFG-Projekt LI2313/6-1 | VE260/10-1 „*Role of meio- and macrofauna in benthic ecosystem functioning: Testing effects of different ice cover regimes*“ im Schwerpunktprogramm SPP 1158 „Antarktisforschung“ danken wir Friederike Säring sowie Moritz Baumann, Ben Behrend, Yasemin Bodur, Merten Bohn, Marco Bruhn, Finn Corus, Benita Degen, Stephan Durst, Jutta Heitfeld, Leon Hoffman, Erik Kusch, Kirsten Macsween, Dorothea Okoniewski, Jan Schuckenbrock, Derya Seifert, Josefine Steiling, Ann-Kathrin Weßels und Jule Wilsenack. Unsere Kooperationspartner/-innen sind Dr. Andreas Bick (Universität Rostock), Dr. Freija Hauquier (Universität Gent, Belgien), Dr. Kerstin Jerosch, Kai-Uwe Ludwichowski, Hendrik Pehlke und Prof. Dr. Dieter Piepenburg (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung), Iris Liskow, Prof. Dr. Maren Voß und Prof. Dr. Joanna Waniek (Institut für Ostseeforschung Warnemünde), PD Dr. Christoph Mayr (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), Prof. Dr. Claus Nielsen (Zoologisk Museum København, Dänemark) und Prof. Dr. Ursula Witte (University of Aberdeen, Großbritannien).

GLOSSAR

Benthosgemeinschaften: Gemeinschaften verschiedener Organismengruppen am Meeresboden. Dabei kann es sich um einzellige (z. B. Bakterien, Mikroalgen) oder mehrzellige Lebewesen handeln (z. B. Pilze, Pflanzen, Tiere). Die Tiere am Meeresboden ordnen wir in verschiedene Größenklassen ein, die sich auch in ihrer Ökologie unterscheiden (z. B. Meiofauna, Makrofauna). Gemeinschaften bestehen aus den Individuen verschiedener Arten. Ihre Zusammensetzung wird von der Biodiversitätsforschung untersucht und beschrieben.

Flux: Bewegung von Energie und Elementen zwischen verschiedenen Kompartimenten z. B. eines Organismus oder Ökosystems. Beispiele für Flux sind Atmung (Sauerstoffverbrauch, Abgabe von Kohlendioxid), Photosynthese (Bindung von Kohlendioxid, Abgabe von Sauerstoff), Remineralisierung (Abgabe von Stoffwechselprodukten, hier anorganischen Substanzen, die u. a. als Dünger für neuerliche Photosynthese dienen können). In unseren Untersuchungen messen wir in Form von Fluxen den Verbrauch von Sauerstoff und die Nährstoffabgabe durch Benthosgemeinschaften im bodennahen Meereswasser.

Food Bank: In Meeresgebieten mit besonders hoher saisonaler Primärproduktion und tiefen Wassertemperaturen wird nicht immer die gesamte Biomasse verbraucht, die mit einem Nahrungspuls auf den Meeresboden gelangt. Zwar kommen Meeresbodenbewohner wie Fadenwürmer, Ruderfußkrebse, Muscheln oder Borstenwürmer in solchen Gebieten mit sehr großen Individuendichten vor, dennoch verwerten sie nicht die gesamte verfügbare Nahrung auf einmal. Zusätzlich sorgen die tiefen Wassertemperaturen (im Südozean oft bis zu -2°C) dafür, dass auch der Abbau der organischen Substanz durch Bakterien verlangsamt ist. So haben die Lebewesen am Meeresboden das ganze Jahr über genügend Nahrung, obwohl es nur im Sommer zu Nahrungseinträgen von oben kommt [22].

Multidimensionale Skalierung: Proben, die mehrere Variablen beinhalten [in unserem Fall die Individuenzahlen verschiedener

Tiergruppen (Abbildung 10) oder auch die verschiedenen Nährstoffflüsse], können mithilfe von Verfahren der multivariaten Statistik verglichen werden. Dazu werden Similaritätsanalysen durchgeführt, mit denen die Ähnlichkeit (Similarität) zwischen allen Proben bestimmt wird. Die grafische Darstellung der zwischen den einzelnen Proben gefundenen Ähnlichkeiten erfolgt in einem multidimensionalen Raum (multidimensionale Skalierung, MDS). Jeder Punkt im MDS entspricht einer Probe mit der Gesamtheit der Tiergemeinschaft, die in ihr vorgefunden wurde. Die Abstände der „Proben“-Punkte im MDS verdeutlichen die Ähnlichkeit zwischen den Proben: je näher, desto ähnlicher. Zur Veranschaulichung können auf die Probenpunkte die Individuenzahlen einzelner Tiergruppen projiziert werden (Abbildung 10). In unserem Fall kann dadurch abgelesen werden, welche Tiergruppen maßgeblich für die Unterschiede der Gemeinschaften (und somit der Proben) zwischen den untersuchten Gebieten „verantwortlich“ sind. Auch bei dieser als „Bubble Plot“ bezeichneten Darstellungsweise repräsentiert die Position jedes Punktes weiterhin die Gesamtheit aller Tiere in einer Probe.

Nahrungspuls: Gesteigerter und zeitlich begrenzter Nahrungseintrag aus der Wassersäule zum Meeresboden. Nahrungspulse entstehen nach Phytoplanktonblüten oder durch das Abschmelzen von Meereis, wodurch Eisalgen freigesetzt werden, die absterben und zum Meeresboden sinken. Auf dem Sediment ist der frische Nahrungseintrag oft anhand einer lockeren grünen Auflage zu erkennen.

Phytoplanktonblüte/Phytoplanktonbloom: Bei günstigen Umweltbedingungen (u. a. ausreichend Licht und Nährstoffe, stabile Schichtung der Wassersäule) kommt es zu einer massenhaften Vermehrung der Mikroalgen im freien Wasser, einer so genannten „Blüte“. Diese Algenblüten sind auch auf Satellitenaufnahmen erkennbar. Das Phytoplankton stirbt anschließend ab, sinkt zum Meeresboden und wird so zur Nahrung für die dort lebenden Gemeinschaften.

Zusammenfassung

Gemeinsam mit unseren Student/-innen und Kooperationspartner/-innen arbeiten wir daran, die Ökosystemfunktionen der Weichböden auf den Schelfgebieten der Antarktis besser zu verstehen. Dafür haben wir an drei Expeditionen mit FS POLARSTERN teilgenommen und Sedimentproben vom Meeresboden in Kühlcontainern an Bord experimentell untersucht. Sauerstoffverbrauch und Remineralisierung sind Funktionen der Gemeinschaften von Lebewesen im Sediment. Als Stoffwechselprodukte setzen sie Nährstoffe frei und sorgen dafür, dass der Kreislauf von Produktion und Abbau weiterläuft. Dabei spielt die Versorgung mit organischem Material aus den oberen lichtdurchfluteten Zonen des Ozeans eine entscheidende Rolle. Und diese Versorgung ist maßgeblich von der Eisbedeckung abhängig.

Summary

Sea ice means life at the seafloor: Ecosystem functions in the Southern Ocean

Together with our students and cooperation partners we are working on a better understanding of the ecosystem functions of soft bottoms on the Antarctic shelf. Therefore, we participated in three expeditions with RV POLARSTERN and experimentally studied sediment samples from the seafloor in reefer containers on board. Oxygen consumption and remineralization are functions of communities of organisms in the sediment. They release nutrients as metabolic end products and ensure that the cycle of production and decomposition continues. The supply of organic material from the photic zone of the ocean plays a crucial role in this process. And this supply largely depends on the sea-ice cover.

Schlagworte

Antarktis, Benthos, Eisbedeckung, Lebensgemeinschaften, Nahrung, Nährstoffkreislauf, Ökosystemfunktion, Meiofauna, Makrofauna

Literatur

- [1] S. Naeem et al. (2012). The functions of biological diversity in an age of extinction. *Science* 336, 1401–1406.
- [2] B. J. Cardinale et al. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486, 59–67.
- [3] D. U. Hooper et al. (2012). A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature* 486, 105–108.
- [4] S. C. Doney et al. (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Annu Rev Mar Science* 4, 11–37.
- [5] J. Gutt et al. (2015). The Southern Ocean ecosystem under multiple climate change stresses - an integrated circumpolar assessment. *Glob Chang Biol* 21(4), 1434–1453.
- [6] G. Hempel, D. Piepenburg (2010). Nord- und Südpolarmeer im Klimawandel. Ein biologischer Vergleich. *Biol Unserer Zeit* 40(6), 386–395.
- [7] B. Beszteri et al. (2020). Kleinlebewesen im sich wandelnden Südpolarmeer – Polares Plankton. *Biol Unserer Zeit* 50(1), 28–38.
- [8] K. R. Arrigo et al. (2008). Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production. *Geophys Res Lett* 35, L19603.
- [9] J. King (2014). Climate science: A resolution of the Antarctic paradox. *Nature* 505, 491–492.
- [10] O. Sachs et al. (2009). Benthic organic carbon flux and oxygen penetration reflect different plankton provinces in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res I* 56, 1319–1335.
- [11] G. Veit-Köhler et al. (2022). Vom antarktischen Schelf bis in die Tiefsee – Große Artenvielfalt im Südpolarmeer. *Biol Unserer Zeit* 51(1), 47–57.
- [12] H. Link et al. (2011). Spring-to-summer changes and regional variability of benthic processes in the western Canadian Arctic. *Polar Biol* 34(12), 2025–2038.
- [13] G. Veit-Köhler et al. (2011). Antarctic deep-sea meiofauna and bacteria react to the deposition of particulate organic matter after a phytoplankton bloom. *Deep Sea Res II* 58, 1983–1995.
- [14] C. Bienhold, A. Boëtius (2017). Mikroorganismen des Tiefseebodens: Vielfalt, Verteilung, Funktion. In: G. Hempel et al. (Ed.) *Faszination Meeresforschung: Ein ökologisches Lesebuch*. Springer Berlin, Heidelberg, S. 211–222.
- [15] H. Link et al. (2013). Are Hotspots Always Hotspots? The Relationship between Diversity, Resource and Ecosystem Functions in the Arctic. *PLOS ONE* 8, e74077.
- [16] D. M. Sigman et al. (1999). The $\delta^{15}\text{N}$ of nitrate in the Southern Ocean: consumption of nitrate in surface waters. *Global Biogeochem Cycles* 13(4), 1149–1166.
- [17] E. N. Ieno et al. (2006). How biodiversity affects ecosystem functioning: roles of infaunal species richness, identity and density in the marine benthos. *Mar Ecol Prog Ser* 311, 263–271.
- [18] E. Sañé et al. (2012). Benthic macrofauna assemblages and biochemical properties of sediments in two Antarctic regions differently affected by climate change. *Cont Shelf Res* 35, 53–63.
- [19] G. Veit-Köhler et al. (2018). Oceanographic and topographic conditions structure benthic meiofauna communities in the Weddell Sea, Bransfield Strait and Drake Passage (Antarctic). *Prog Oceanogr* 162, 240–256.
- [20] U. Witte et al. (2003). In situ experimental evidence of the fate of a phytodetritus pulse at the abyssal sea floor. *Nature* 424, 763–766.
- [21] F. Säring et al. (2022). Sea-ice-related environmental drivers affect meiofauna and macrofauna communities differently at large scales (Southern Ocean, Antarctic). *Mar Ecol Prog Ser* 700, 13–37.
- [22] S. L. Mincks et al. (2005). Persistence of labile organic matter and microbial biomass in Antarctic shelf sediments: evidence of a sediment “food bank”. *Mar Ecol Prog Ser* 300, 3–19.
- [23] J. M. Grebmeier (2012). Shifting patterns of life in the Pacific Arctic and sub-Arctic seas. *Ann Rev Mar Sci* 4, 63–78.
- [24] J. Gutt et al. (2022). Reviews and syntheses: A framework to observe, understand and project ecosystem response to environmental change in the East Antarctic Southern Ocean. *Biogeosciences* 19, 5313–5342.

Verfasst von:



Dr. Heike Link untersucht die Zusammenhänge von Ökosystemfunktionen, biogeochemischen Prozessen und Diversität am Meeresboden. Dafür war sie mehrfach mit der AMUNDSEN (Kanada) und POLARSTERN in Arktis und Südlichem Ozean auf Forschungsreise. An der Universität Rostock koordiniert sie das Department Maritime Systeme der Interdisziplinären Fakultät und ist Mitglied im Zukunftsforum Ozean des Konsortiums Deutscher Meeresforschung.



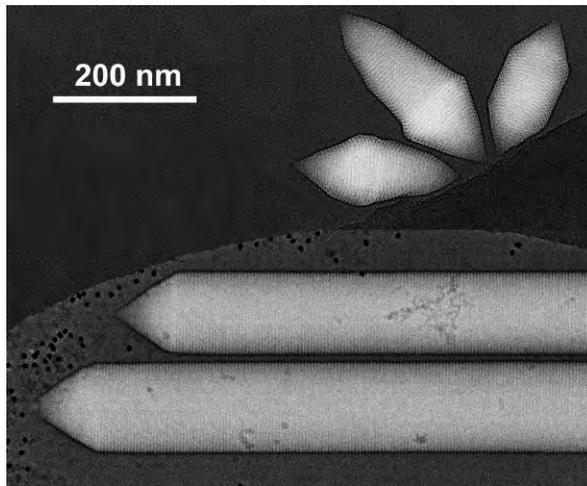
Dr. Gritta Veit-Köhler hat auf Forschungsstationen in der Arktis und Antarktis gearbeitet und an mehreren POLARSTERN-Expeditionen teilgenommen. Gemeinsam mit ihren Student/-innen erforscht sie die Ökologie der Meiofauna und die Taxonomie von bodenlebenden Ruderfußkrebse. Sie leitet das Fachgebiet Ökologische Biodiversitätsforschung am Deutschen Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung (DZMB) bei Senckenberg am Meer in Wilhelmshaven.

Korrespondenz

Dr. Gritta Veit-Köhler
Senckenberg am Meer
Deutsches Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung
Südstrand 44
26389 Wilhelmshaven
E-Mail: gveit-koehler@senckenberg.de

Von der Grundlagenforschung in die Anwendung Gasvesikel und ihr Einsatz in der Biomedizin

FELICITAS PFEIFER



Isolierte Gasvesikel aus *Halobacterium salinarum*. Montage aus zwei Cryo-Elektronenmikroskopie-Aufnahmen.
Aufnahme: Bollschweiler & Engelhardt, MPI für Biochemie.

Gasvesikel werden von einigen Mikroorganismen als Schwebhilfe genutzt. Die Gasumgebende Hülle wird hauptsächlich von den beiden Proteinen GvpA und GvpC gebildet, aber zehn weitere Gvp-Proteine sind am Aufbau beteiligt. Die bis zu 1 µm langen Gasvesikel sind stabil und streuen Ultraschall; sie werden als neuartiges Kontrastmittel in der Biomedizin eingesetzt. Dekoriert mit zusätzlichen Peptiden auf der Oberfläche eignen sie sich zur Herstellung von Vakzinen.

Gasvesikel sind intrazelluläre, gasgefüllte Nanostrukturen, die Mikroben ein vertikales Schweben bis zur Oberfläche des wässrigen Habitats erlauben. Sie wurden erstmals 1895 von H. Klebahn im Wasserblüten-bildenden Cyanobakterium *Gloeotrichia* beschrieben. Durch Druck sind sie leicht zu zerstören; sie werden im Anschluss aber erneut gebildet. Dies lässt sich auch am Archaeon

Halobacterium salinarum zeigen: Die vor der Behandlung als helle Partikel gut wahrnehmbaren Gasvesikel kollabieren unter Druck und sind nicht mehr sichtbar. Zwei Stunden danach sind in den Zellen wieder kleine Gasvesikel zu erkennen (Abbildung 1). Nach 20 h sind die Zellen mit Gasvesikeln prall gefüllt.

Der Besitz von Gasvesikeln verhindert ein Absinken der Zellen und erlaubt ein Schweben; etwa drei bis zehn Prozent des Zellvolumens muss von ihnen eingenommen werden, damit eine Zelle zur Oberfläche flottiert. Im Labor von Anthony Walsby (Bristol, UK) wurden Gasvesikel vor allem bei Cyanobakterien wie *Anabaena flos-aquae* und *Microcystis* ausgiebig untersucht [1]. Die während der Fotosynthese gebildeten Zuckermoleküle wirken als Ballaststoffe und lassen die ansonsten unbeweglichen Cyanobakterien sinken. Nach der Zuckerverwertung steigen sie am Morgen wieder auf, um Fotosynthese zu betreiben. Kolonien von *Microcystis* mit 2–4 mm Durchmesser steigen mit einer Geschwindigkeit von 1 mm pro Sekunde auf; bei einzelnen Bakterienzellen sind die Steigzeiten allerdings deutlich langsamer. Auch halophile Archaea wie *Hbt. salinarum*, *Haloferax mediterranei* oder das quadratische *Haloquadratum walsbyi* produzieren Gasvesikel, mit denen sie im Habitat schweben. Diese sind spindel- oder zylinderförmig mit konischen Endkappen und werden mit einem Durchmesser von bis zu 250 nm etwa doppelt so breit wie cyanobakterielle Gasvesikel [2] (Abbildung 2).

Auch *Bacillus megaterium* bildet Gasvesikel, ebenso wie *Serratia* sp. ATCC39006, das aus einem Brackwasserhabitat isoliert wurde [3, 4]. Schwimmen mit Flagellen und Schweben mit Gasvesikeln schließen sich bei *Serratia* aus, denn beide Bewegungsarten sind entgegengesetzt reguliert. Im Unterschied dazu schwimmt und flottiert *Hbt. salinarum* gleichzeitig. Wegen der Lichtstreuung durch Gasvesikel sind die Kolonien dieses Archaeons milchig-trübe gefärbt (Abbildung 3). *Hbt. salinarum* lebt in Salzseen oder Salinen, wo Meersalz gewonnen wird. Bei einer Salzkonzentration über 25 % (w/v) bis hin zur Sättigung (5,2 M NaCl) sind die Kristallisationsbecken intensiv rot gefärbt. Dafür verantwortlich sind Carotinoidfarbstoffe der Archaea, aber auch der Grünalge *Dunaliella salina*. Während Haloarchaea die „salt-in“-Strategie verwenden, um sich an die hohen Salzkonzentrationen anzupassen,

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 153 erklärt.

und dazu im Zellinneren genauso viel K- und Cl-Ionen anreichern wie Na- und Cl-Ionen im Außenmedium vorhanden sind, synthetisiert *Dunaliella* große Mengen an Glycerin. *Hbt. salinarum* ist außerdem für die Bildung von Bakteriorhodopsin bekannt – einem Retinalprotein, das mit Hilfe von Sonnenlicht einen Protonengradienten über die Cytoplasmamembran aufbaut, der von einer ATP-Synthase zur Bildung von ATP genutzt wird.

Die Strukturproteine GvpA und GvpC

Gasvesikel von *Hbt. salinarum* können leicht durch Lysis der Zellen in Wasser freigesetzt und durch mehrfaches Zentrifugieren bei niedriger Drehzahl (60g) als an der Oberfläche flottierende, weiße Schicht gereinigt werden. Eine solche Suspension kann über Monate im Kühlschrank aufbewahrt werden. Die Gasvesikelhülle besteht ausschließlich aus Protein und umschließt einen Hohlraum, der sich passiv mit den im Cytoplasma gelösten Gasen füllt. In cryo-elektronenmikroskopischen Aufnahmen sind 4,6-nm breite Rippen quer zur Längsachse der Hülle zu erkennen, die von einer Helix mit niedriger Ganghöhe herrühren. Am oberen Ende jeder Rippe sind regelmäßig auftretende, kleine Löcher zu erkennen, durch die wahrscheinlich Gasmoleküle in das Innere eindringen und wieder hinausgelangen. Eine Speicherung von Gasen ist daher nicht möglich. Die Hülle ist so steif, dass isolierte Gasvesikel auch im Vakuum im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) stabil sind (Abbildung 2).

Durch N-terminales Ansequenzieren der Gasvesikel von *Anabaena flos-aquae* (Ana-GV) wurde bereits 1986 ein Großteil der Aminosäuresequenz des etwa 70-Aminosäure-großen Proteins GvpA ermittelt, das durch Aggregation die Rippen der Gasvesikel bildet. GvpA ist amphiphil und bildet auf der Gas-zugewandten Seite eine hydrophobe Oberfläche [1]. Auf der Außenseite der Hülle liegt das zweite Strukturprotein GvpC, das die Hülle stabilisiert und bei haloarchaealen Gasvesikeln (Halo-GV) mit Wasser leicht abgewaschen werden kann [5,6]. Bei Ana-GV muss dagegen 6 M Harnstoff zur Entfernung von GvpC verwendet werden [1]. Die darunter liegende Hülle bleibt bei dieser Prozedur intakt und die GV können mit neuen GvpC-Molekülen beladen werden. Die Aminosäuresequenz von GvpC zeigt Sequenzwiederholungen (*Repeats*) mit einer Länge von 32–39 Aminosäuren. Beim *Anabaena*-GvpC sind es fünf *Repeats* von jeweils 33 Aminosäuren, während das größere *Hbt. salinarum*-GvpC sieben weniger konservierte Sequenzwiederholungen einer Länge von 32–39 Aminosäuren aufweist. Die Zahl der *Repeats* korreliert mit dem Durchmesser der GV (je mehr *Repeats* desto größer) und beeinflusst invers die Stabilität, d. h. je weniger *Repeats* in GvpC vorhanden sind, desto stabiler sind die Gasvesikel. Halo-GV mit einem Durchmesser von bis zu 250 nm haben nur eine geringe Druckstabilität von 0,1 Mega-Pascal (MPa), während Ana-GV mit einem Durchmesser von 80–100 nm erst bei 0,55 MPa und GV von *Microcystis* bei 0,8 MPa kollabieren [1]. Ana-GV

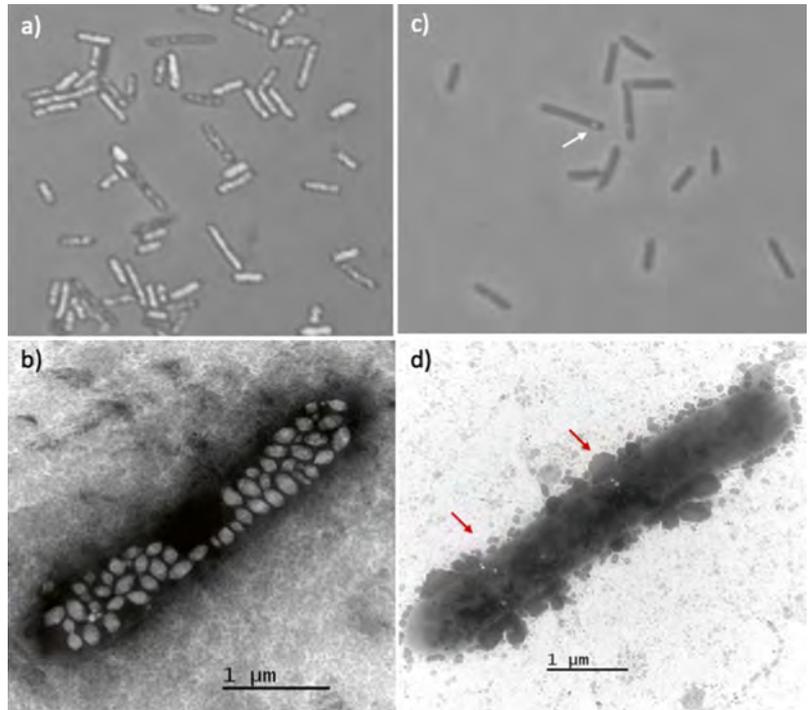


ABB. 1 Gasvesikel von *Hbt. salinarum* vor und nach der Anwendung von hydrostatischem Druck. Lichtmikroskopische Aufnahmen einer Kultur vor der Druckapplikation (a) bzw. 2 h danach (c). b), d) Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme (TEM) der Zellen zu gleichen Zeitpunkten wie a), b). Pfeile in c) und d) markieren kleine Gasvesikel. Abb.: Fröls & Pfeifer, TU Darmstadt.

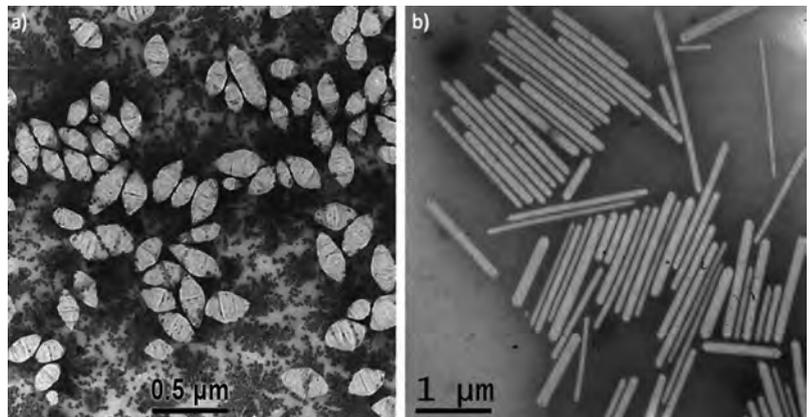


ABB. 2 Isolierte Gasvesikel aus *Hbt. salinarum* im TEM. a) Spindelförmige Gasvesikel aus Wildtyp-Zellen. b) Zylinderförmige Gasvesikel einer Variante mit der Punktmutation I34M in GvpA. Abb.: Faist & Pfeifer, TU Darmstadt.

IN KÜRZE

- Gasvesikel werden von Bakterien und Archaea als **Schwebhilfe** verwendet. Ihre Hülle besteht ausschließlich aus Protein.
- Aufgrund ihrer Stabilität und der leichten Manipulation ihrer Oberfläche werden sie zur Herstellung von **Vakzinen** oder als **akustische Biosensoren** verwendet.
- Zudem werden sie als **Kontrastmittel** für Ultraschall- oder MRT-Untersuchungen eingesetzt.

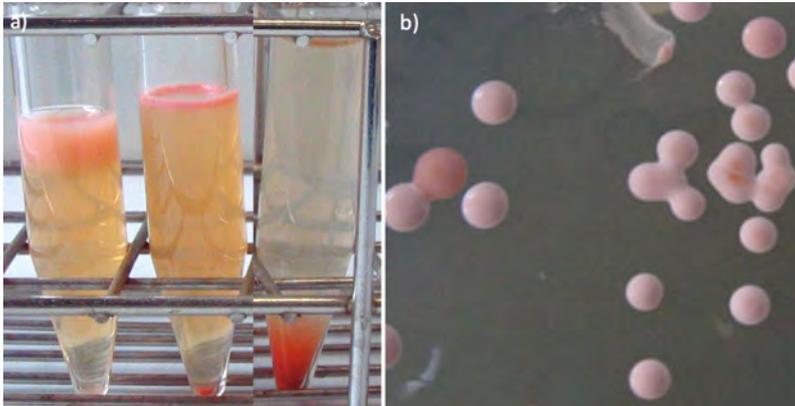


ABB. 3 Haloarchaea-Kulturen in Flüssig- und auf Festmedium. a) Flüssigkultur von *Hbt. salinarum* PHH1 (links), PHH4 (Mitte) und *Haloferax volcanii* (rechts). Die Proben standen nach der Kultivierung für eine Woche am Arbeitsplatz. Vac^- -Zellen (rot) sinken auf den Boden, während Vac^+ -Zellen bis zur Oberfläche schweben. b) Kolonien von *Hbt. salinarum* PHH1 auf Festmedium. Abb.: Fröls & Pfeifer, TU Darmstadt.

ohne GvpC platzen allerdings schon bei 0,19 MPa, während mit GvpC wiederbeladene Ana-GV erst bei 0,53 MPa zerstört werden. Diese Daten zeigen, wie gut GvpC diese Nanostruktur stabilisiert.

Gasvesikelgene

Anhand der Aminosäuresequenz von GvpA wurden genetische Sonden erstellt, mit denen das *gvpA*-Gen isoliert werden konnte. Es liegt bei *Anabaena* und bei *Halobacterium* direkt neben *gvpC* [2]. Über Transformationsexperimente mit Gasvesikel-defizienten (Vac^-) *Haloferax volcanii* konnte schnell geklärt werden, dass *gvpAC* nicht ausreichen, um diese Nanostrukturen zu bilden. Ein zufällig verwendetes und mit 12 kbp deutlich größeres DNA-Fragment mit den *gvpAC*-Genen aus *Hfx. mediterranei* führte dagegen zu gasvesikelbildenden (Vac^+) *Hfx.*

volcanii-Transformanten. Die Deletion von Randbereichen dieses Fragments zeigte dann, dass fast der gesamte Bereich für deren Synthese nötig ist [2]. Schließlich wurden 14 *gvp*-Gene bei *Hbt. salinarum* (p-vac-Region) bzw. *Hfx. mediterranei* (mc-vac-Region) identifiziert, die in den umgekehrt zueinander liegenden Gengruppen *gvpACNO* und *gvpDEFGHIJKLM* angeordnet sind. Die Gene *gvpD* und *gvpE* kodieren zwei Haloarchaea-spezifische Genregulatoren, welche die Aktivität des P_A - bzw. P_D -Promotors vor *gvpA* bzw. *gvpD* beeinflussen (Tabelle 1). GvpE ist ein Transkriptionsaktivator, während GvpD zur Reduktion der GvpE-Menge beiträgt und so die Gasvesikelbildung reprimiert [2]. Die anderen Gvp-Proteine werden nur in geringen Mengen produziert und sind häufig essenziell wie Deletionsexperimente einzelner *gvp*-Gene in *Hfx. volcanii*-Transformanten zeigen [7]. Ohne sichtbare Gasvesikel (Vac^-) sind die ΔA -, ΔF -, ΔG -, ΔJ -, ΔK -, ΔL -, ΔM - oder ΔO -Transformanten (Tabelle 1). ΔC -Transformanten enthalten dagegen große Gasvesikel unregelmäßiger Form und ΔH -Transformanten instabile Gasvesikel, während ΔI -Transformanten sehr lange, zylindrische Gasvesikel bilden [7]. ΔN -Transformanten produzieren dagegen nur sehr kleine Gasvesikel. Die AAA-ATPase GvpN, deren hydrolytische Aktivität bei *Anabaena* gezeigt wurde, ist daher für die Vergrößerung der Gasvesikel wichtig.

Sehr ähnliche *gvp*-Gengruppen sind auch bei Bakterien beschrieben: So enthält *A. flos-aquae* das Operon *gvpAAAAAACNJKFGVW* mit sieben identischen *gvpA*, *Bacillus megaterium* die Gengruppe *gvpAPQBRNF-GLSKJTU* und *Serratia* die beiden hintereinander liegenden *gvpA₁CNVF₁GWA₂KXA₃Y*- und *gvrA-gvpHZF₂F₃gvrBC*-Operons [3, 4, 8]. In allen Fällen sind die Gene *gvpA*, *C*, *F*, *G*, *J*, *K*, *L*, *M* und *N* präsent, die bis auf *gvpC* und *gvpN* bei *Hbt. salinarum* als essenziell identifiziert wurden.

Mögliche Funktionen der akzessorischen Gvp-Proteine

Trotz der Bedeutung der akzessorischen Gvp-Proteine für die Gasvesikelbildung sind ihre Funktionen noch nicht ganz geklärt. Die sehr rigiden Gasvesikel lassen sich in Detergenz-haltigem Puffer nicht in ihre Einzelproteine zerlegen; nur GvpC kann mit Hilfe von Natriumdodecylsulfat-(SDS)-haltigen Puffern entfernt werden, während die Nanostruktur intakt bleibt. Transkriptionsstudien zeigen, dass die Gene *gvpFGHIJKLM* von *Hbt. salinarum* bereits in einer frühen Wachstumsphase transkribiert werden. Daher lässt sich vermuten, dass die Proteine bei der Initiation der Gasvesikel eine Rolle spielen. Die Aktivität des Promotors P_F liegt aber deutlich unter der Aktivität des P_A -Promotors vor *gvpACNO*, der durch GvpE etwa 10-fach hochreguliert wird, um die >10.000 GvpA-Moleküle in der Hülle eines Gasvesikels zu produzieren [2]. Pro Zelle werden etwa 30 bis 70 Gasvesikel gebildet. Interaktionsstudien zeigen, dass die Gvp-Proteine miteinander interagieren; GvpL, N oder C haben sogar fast alle anderen Gvp-Proteine als Partner [6]. Eine Interaktion von GvpA und GvpF

TAB 1. GVP-PROTEINE AUS HBT. SALINARUM

Gvp	Funktionen
GvpA	Hauptstrukturprotein; verwandt mit GvpJ und GvpM
GvpC	stabilisiert Außenoberfläche der GV; bedingt die Zylinderstruktur
GvpN	AAA-ATPase; essenziell für Vergrößerung der GV durch Einbau von GvpA
GvpO	essenziell für die GV-Bildung, bindet an GvpN
GvpD	Repression: Anwesenheit von GvpD führt zur Reduktion von GvpE
GvpE	Transkriptionsaktivator für den P_A - und P_D -Promotor
GvpF	essenziell, bindet GvpA-Monomer, GvpA-Chaperon?
GvpG	essenziell; Partner von GvpL und GvpF
GvpH	nicht-essenziell; stabilisiert die Hülle
GvpI	nicht-essenziell; Fehlen führt zu langen GV (>1 μ m)
GvpJ	essenziell, verwandt mit GvpA und GvpM
GvpK	essenziell
GvpL	Plattform für die Bindung aller Gvp-Proteine außer von GvpA
GvpM	essenziell, verwandt mit GvpA und GvpJ

(A/F) bzw. die A/N- oder A/O-Interaktionen sind gut nachweisbar. GvpF könnte als Chaperon fungieren, um das hydrophobe GvpA vor dem Einbau in Lösung zu halten und/oder GvpA für den Einbau in die Rippe zu orientieren. GvpF interagiert auch mit GvpL, das mit allen anderen Gvp außer GvpA interagiert [6]. Eine Interaktion von GvpA und GvpC konnte aber nicht gezeigt werden. Ein Grund dafür wäre, dass GvpC nur die bereits aggregierten GvpA-Moleküle der Hülle erkennt. Aufgrund seiner vielen Interaktionspartner könnte GvpL als Plattform für die kleineren Gvp dienen und so zur Bildung eines initialen Proteinkomplexes beitragen, der die GvpA-Aggregation am Start der Gasvesikelbildung unterstützt [6].

Struktur von GvpA in der Gasvesikelhülle

Eine Kristallisation von GvpA zur Ermittlung der 3D-Struktur ist wegen der Hydrophobizität von GvpA leider nicht möglich. Bioinformatische Analysen schlagen als Sekundärstruktur eine α - β - α -Struktur vor (Abbildung 4a). *In silico* wurde für das haloarchaeale GvpA eine 3D-Struktur modelliert, die *in vivo* über die Substitution einzelner Aminosäuren und deren Auswirkung auf die Gasvesikelbildung in $\Delta A+A_{mut}$ -Transformanten überprüft wurde [5]. Wichtig für die Struktur sind z. B. die polaren Aminosäuren der N-terminalen α -Helix $\alpha 1$, der β -Turn zwischen den beiden antiparallelen β -Faltblättern sowie einzelne Aminosäuren im β -Faltblattbereich und im ersten Teil der Helix $\alpha 2$ (Abbildung 4a). Viele der essenziellen Aminosäuren in GvpA sind auch am Kontakt zu GvpF beteiligt. Der β -Faltblattbereich vernetzt GvpA-Moleküle in der Rippe und bildet die sehr hydrophobe Innenoberfläche der Gasvesikelhülle, während der β -Turn zur Vernetzung zweier benachbarter Rippen beiträgt.

Vor kurzem wurden Gasvesikel von *B. megaterium* und *A. flos-aquae* mittels Cryo-EM bzw. Cryo-Elektronentomographie hochaufgelöst dargestellt und die 3D-Struktur von GvpA in der Hülle ermittelt [9, 10]. Auch die exakte Lage von GvpC auf der GV-Oberfläche wurde bestimmt. Das Protein bindet mit jedem der 33-Aminosäure-Repeats vier GvpA-Moleküle einer Rippe und folgt als durchgängig α -helikales Protein der Rippe wie ein Seil, das das Gasvesikel umschlingt. Punktuelle Kontakte von GvpC bestehen zur Helix $\alpha 2$ von GvpA. Beide Hälften der Gasvesikelhülle werden von GvpA-Molekülen in umgekehrter Orientierung gebildet (Abbildung 4b, c). Etwa in der Mitte jedes GV ist daher ein „Saum“ erkennbar, wo die Interaktion zwischen den beiden benachbarten Rippen anders verläuft als bei weiter entfernt liegenden Rippen (Abbildung 4c). Hier treffen die β -Turns benachbarter GvpA-Moleküle aufeinander, während der Kontakt der GvpA-Moleküle in den Rippen der beiden Hälften über die N-terminalen Aminosäuren vor der Helix $\alpha 1$ erfolgt, die von außen auf dem β -Faltblattbereich des benachbarten GvpA-Moleküls aufliegen [9]. Die dahinter liegende Helix $\alpha 1$ bildet den „Steg“ zwischen den kleinen Löchern, durch die Gase frei diffundieren. Die Assemblierung eines Gasvesikels beginnt an

den Spitzen der beiden Kappen, und der zunächst gebildete Bikonus wird durch den Einbau weiterer GvpA-Moleküle in der „Saumregion“ in der Mitte der Nanostruktur vergrößert. Hier könnten auch GvpN (und GvpO?) lokalisiert sein, die beide mit GvpA interagieren und zum Einbau von GvpA benötigt werden [6]. An der Spitze der beiden Kappen bleibt eine kleine Öffnung, die von akzessorischen Gvp-Proteinen geschlossen werden könnte. Die hier lokalisierten $\alpha 1$ -Helices von GvpA binden auch GvpF und GvpJ [6]. Dies ist ein erstes Modell, um die Selbstassemblierung (*self-assembly*) der Nanostruktur zu erklären.

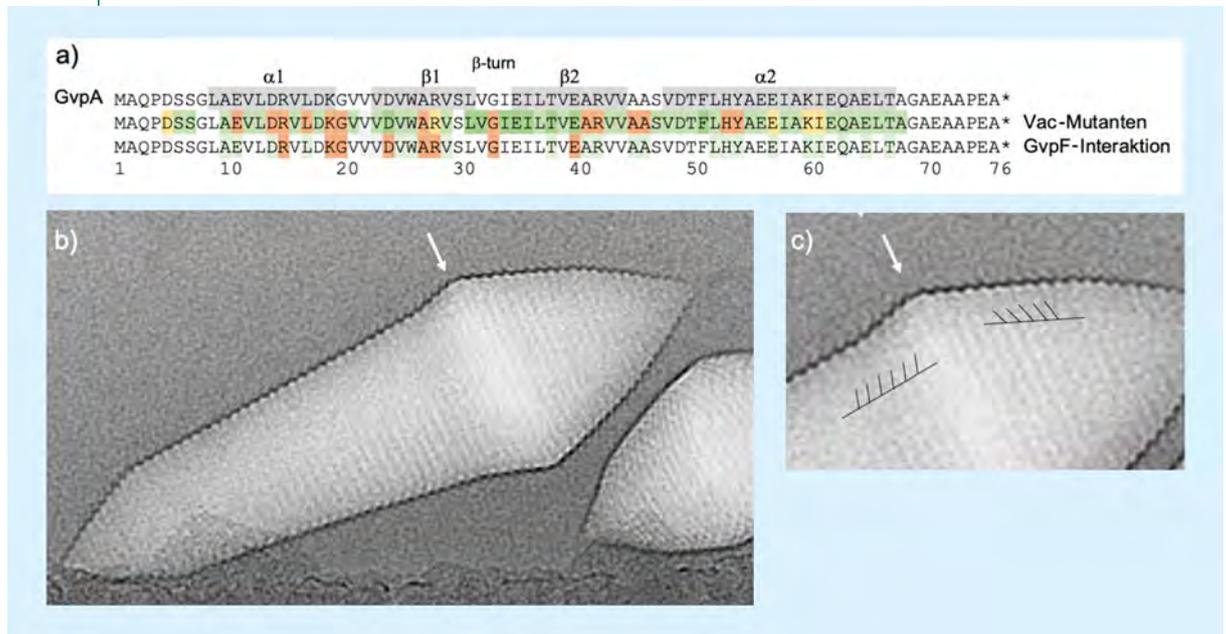
Einsatz von Gasvesikeln in der biomedizinischen Forschung

Die Stabilität der Gasvesikel und ihre große Oberfläche, die leicht über eine Fusion von GvpC mit Fremdproteinen oder -peptiden „dekoriert“ werden kann, eröffnet die Möglichkeit, Gasvesikel für (bio)medizinische Fragestellungen zu nutzen. Zwei Richtungen werden hier verfolgt: (1) die Dekoration der GV mit Peptiden pathogener Bakterien oder Viren zum Einsatz für die Antikörperproduktion (Antigen-Display-System) und (2) die Verwendung von GV als neuartiges Kontrastmittel für Ultraschalluntersuchungen oder in der Magnetresonanztomographie (MRT).

Für die Antigenpräsentation wurden bakterielle oder virale Peptide an den C-Terminus des haloarchaealen GvpC fusioniert und entsprechend modifizierte GV in *Hbt. salinarum* hergestellt [11]. Diese Halo-GV können leicht isoliert und gereinigt werden. In Kaninchen oder Mäusen ist eine Immunisierung mit den Halo-GV ohne Zusatz von einem Adjuvans sehr effektiv. Gegen Gasvesikel - dekoriert mit Peptiden des *Simian Immunodeficiency Virus* (SIV) oder einem äußeren Membranprotein von *Chlamydia trachomatis* - wurden bereits langlebige Immunantworten erhalten. Gasvesikel sind in *Hbt. salinarum* stabil und die Kühlung der Zellen ist nicht erforderlich. Da Archaea kein Lipopolysaccharid enthalten, besteht auch keine Gefahr einer Verunreinigung mit toxischem ▶ Lipoid A.

Der Einsatz der Gasvesikel als akustische Reporter in der Sonographie wurde vor allem von Mikhail Shapiro (Pasadena, USA) forciert [12]. Bei der Ultraschalldiagnostik werden normalerweise chemisch synthetisierte Luftbläschen mit über 1 μ m Durchmesser verwendet, die von einer Lipid-, Protein- oder DNA-Hülle umgeben sind. Diese Mikron-Luftbläschen sind relativ instabil, und wegen ihrer Größe ist ihr Eindringen in Gewebe begrenzt [13]. Im Gegensatz dazu sind Gasvesikel deutlich kleinere, stäbchenförmige Strukturen, die in Agarblöckchen eingebettet im Ultraschall gut nachweisbar sind. Auch in Mäusen injiziert sind ihre Echosignale gut zu erkennen. Wegen ihres kleinen Durchmessers können GV die Wand des Blutgefäßsystems passieren und in das extravaskuläre Gewebe eindringen. Vorteilhaft gegenüber den Mikron-Luftbläschen ist ihre Stabilität, und gefüllt mit ▶ hyperpolarisiertem $^{129}\text{Xenon}$ sind sie sogar in picomolarer Konzentration mit-

ABB. 4 | GVPA-SEQUENZ UND ISOLIERTE GASVESIKEL IM CRYO-EM.



a) Aminosäuresequenz von GvpA und Markierung der α - β - β - α -Struktur (grau unterlegt). In der zweiten Zeile sind Aminosäuren in rot unterlegt, deren Substitution $Vac^- \Delta A+A_{mut}$ -Transformanten ergibt [5]. Aminosäuren, die bei Substitution zu kleinen Gasvesikel führen, sind gelb markiert, und in grün Positionen, die Vac^+ -Transformanten ergeben. Für die A/F-Interaktion (3. Zeile) sind die wichtigen Aminosäuren rot markiert; die hellgrün markierten sind nicht relevant für die Gasvesikelbildung. b) Isolierte Halo-GV im Cryo-EM. c) Ausschnitt aus b) mit Hervorhebung der Richtung einer am Rand sichtbaren Struktur von GvpA. GvpA-Moleküle liegen in beiden Hälften daher in umgekehrter Orientierung. Der Pfeil in b) und c) markiert den „Saum“. Aufnahme: Bollschweiler & Engelhardt, MPI für Biochemie.

tels Magnetresonanztomographie (MRT) nachweisbar [12]. Konventionelle MRT-Kontrastmittel werden erst im μ M-Bereich detektiert; hier werden ► superparamagnetische Eisenoxide oder ► paramagnetische Lanthanoide wie das Seltenerdmetall Gadolinium eingesetzt, die in hoher Konzentration potenziell toxisch sind.

Gasvesikel kollabieren bei akustischem Druck, der bis zu 9-fach über dem kritischen hydrostatischen Druck liegt, und werden kontrastlos, was in den Ultraschallaufnahmen vor und nach der akustischen Druckapplikation gut erkennbar ist. Wie beim hydrostatischen Druck ist auch die akustische Drucktoleranz von GV aus verschiedenen Spezies unterschiedlich. Gasvesikel aus *Bacillus megaterium* (Mega-GV) sind vom Durchmesser her etwa 7-fach kleiner als die großen Halo-GV, und die Ana-GV von *A. flos-aquae* liegen mit etwa 100-nm-Durchmesser dazwischen. Diese Unterschiede erlauben ► Multiplex-Imaging-Analysen. Die Drucksensitivität der GV-Hülle wird zudem durch GvpC auf der Oberfläche beeinflusst, und so kommen auch GV mit modifiziertem GvpC zum Einsatz.

Ana-GV dekoriert mit GvpC plus Arginyl-Glycyl-Asparatyl-Rest (RGD) am C-Terminus reichern sich z. B. spezifisch auf einer Integrin-überproduzierenden humanen Glioblastom-Zelllinie an, da RGD effizient an Integrin bindet [14]. Auf diese Weise erlauben GvpC-Modifikationen ein zelluläres Targeting. Aber auch proteolytische Enzymaktivitäten wurden mit GV als akustischem Reporter stu-

dirt [15]. Getestet wurde z. B. die Endopeptidase TEV, deren spezifische Erkennungssequenz in den *Repeat 2* von GvpC eingebaut wurde. Werden solche Ana-GV *in vitro* der Protease ausgesetzt, fragmentiert diese GvpC, aber die darunter liegende Hülle bleibt intakt. Die Stabilität der GV wird dadurch signifikant erniedrigt, was über den kritischen akustischen Druck messbar ist [15]. In lebenden Bakterienzellen wurde dies anhand von ClpXP getestet. ClpX ist ein ATP-abhängiges Entfaltungsprotein, das ein Zielprotein mit entsprechender Erkennungssequenz (Degron) entfaltet und an ClpP zum Abbau übergibt. GvpC mit dem ClpXP-Degron am C-Terminus wird durch ClpXP degradiert – auch hier bleibt die Gasvesikelhülle intakt, kollabiert aber bei einem erheblich geringeren akustischen Druck. Steht die Expression der *clpXP*-Gene in *E. coli* unter einem Arabinose-induzierbaren Promoter, kann der Abbau von GvpC durch Arabinosegabe gesteuert und über Ultraschallanalysen beobachtet werden. Ana-GV eignen sich daher als akustische Biosensoren zur direkten Messung der Genexpression [15].

Die Fähigkeit der GV, spezifische Zelltypen in Säugtieren zu erkennen, sich hier anzureichern und diese im Ultraschall besser sichtbar zu machen, wird auch dazu verwendet, Tumoren in Säugern aufzuspüren. Zum Beispiel wurden Halo-GV in Mäuse gespritzt, die Tumoren in der Leber enthalten [13]. Die im Tumor angereicherten GV waren gut zu erkennen, und ein kurzes, akustisches

Drucksignal eliminierte ihr Echo sofort. Die GV waren sogar in den inneren Bereich des Tumors vorgedrungen, was konventionelle Kontrastmittel aufgrund ihrer Größe nicht können. In ähnlicher Weise wurden auch Gasvesikel von *Microcystis* getestet [16]. Sie reichert sich im Tumor in großen Mengen an. Die GV sind für Säuger nicht toxisch und eignen sich daher für das *in-vivo*-Imaging. Sie könnten aber auch als Vehikel verwendet werden, um Medikamente im Tumor gezielt zu platzieren [13,16]. Die Entwicklungen gehen auf diesem Gebiet sehr stürmisch voran – neben der Shapiro-Gruppe sind hier vor allem chinesische Arbeitsgruppen aktiv.

Fazit

Aus einer ursprünglich zum Flottieren von Mikroben entwickelten Nanostruktur, die über 50 Jahre nur wenige Arbeitsgruppen interessierte, wurde eine stabile Nanostruktur entwickelt, die für Ultraschallanalysen oder für die Präsentation von Fremdproteinen im Säuger verwendet werden kann. Die grundlegenden Forschungen an GV fanden lange in einer Nische statt. Gasvesikel waren für biochemische Analysen zu stabil, und das Hauptstrukturprotein GvpA konnte aufgrund seiner hohen Hydrophobizität nicht kristallisiert werden. Mittels moderner Cryo-EM-Techniken wurde das Rätsel ihres Aufbaus aber vor kurzem gelöst. Großen Schub erhielt das Forschungsgebiet durch das Interesse von Medizinerinnen an stabilen, proteinumhüllten Luftbläschen zur Anwendung in der Ultraschall- oder MRT-Diagnostik. In Zukunft wird sicher noch einiges über den Einsatz der Gasvesikel zu lesen sein.

Zusammenfassung

Gasvesikel sind gasgefüllte, intrazelluläre Nanostrukturen, die von einigen Mikroben als Schwebhilfe im wässrigen Milieu gebildet werden. Fotosynthetische Cyanobakterien und das extrem salzliebende Archaeon *Halobacterium salinarum* flottieren damit energiesparend bis zur Wasseroberfläche. Obwohl die Gas-umgebende Hülle aus nur zwei Gvp-Proteinen besteht, sind über zehn weitere Gvp-Proteine am Aufbau dieser spindel- oder zylinderförmigen Nanostrukturen beteiligt. Gasvesikel sind leicht isolierbar und streuen Wellen wie Licht oder Ultraschall. Sie werden als neuartige Kontrastmittel für Ultraschalluntersuchungen oder in der Magnetresonanztomographie verwendet und sind als akustische Biosensoren einsetzbar. Über das Oberflächenprotein GvpC sind ihre Eigenschaften und ihre Stabilität modulierbar. Eine Fusion von GvpC mit Peptiden bakterieller oder viraler Krankheitserreger erzeugt zudem dekorierte Gasvesikel, die zur Herstellung von Vakzinen eingesetzt werden.

Summary

Gas vesicles and their application in biomedicine

Gas vesicles are gas-filled, intracellular nanostructures produced by several microbes as flotation device in their watery

GLOSSAR

Lipoid A: Synonym: Lipid A; Lipidbestandteil von Lipopolysaccharid in der äußeren Membran Gram-negativer Bakterien.

hyperpolarisiertes ¹²⁹Xenon: Eine Probe, in der ein Zustand des Elektronenspins gegenüber dem anderen deutlich mehr überwiegt als die Energiedifferenz über die Boltzmann-Statistik vorhersagt, nennt man hyperpolarisiert. Hyperpolarisiertes ¹²⁹Xenon wird über den Umweg der Polarisierung von Elektronenspins von Alkalimetallgas erreicht, deren Hüllenelektronen durch optische Pumpen ausgerichtet wurden. Bei der Mischung beider Gase richten die ausgerichteten Elektronenspins der Alkalimetallgase die Kernspins der Edelgase aus. Hyperpolarisiertes ¹²⁹Xe wird in der Kernspinresonanz (NMR) bzw. Magnetresonanztomographie (MRT) angewandt und ist als Kontrastmittel sehr gut zu erkennen.

Paramagnetische Lanthanoide: Gadolinium-haltige Verbindungen; Paramagnetismus tritt nur in Stoffen auf, deren Atome oder Moleküle ungepaarte Elektronen besitzen und ein magnetisches Moment haben. Paramagnetische Materialien zeigen ohne äußeres Magnetfeld keine magnetische Ordnung. Gadolinium-haltige Verbindungen werden als MRT-Kontrastmittel verwendet; sie verkürzen die T₁-Relaxationszeit (d. h. die Zeit zur Wiederausrichtung des Kernspins der Atome entlang des angelegten Magnetfeldes nach dem Hochfrequenzimpuls), indem sie dem angeregten Spin die Energie schneller entziehen.

Superparamagnetische Eisenoxide: SPIO: superparamagnetic iron oxide; kleine Eisenoxidpartikel in der Größenordnung von wenigen Nanometern weisen ohne Magnetfeld keine Magnetisierung auf, lassen sich im Magnetfeld aber stark magnetisieren (= Superparamagnetismus). Sie können polykristalline Partikel mit bis zu 100 nm Durchmesser bilden. Mit organischem Hüllmaterial (Stärke, Dextran, PEG, aber auch Proteine, DNA) versehen werden solche Nanopartikel als MRT-Kontrastmittel verwendet. Sie verkürzen die T₁- und T₂-Relaxationszeit.

Multiplex Imaging: Simultane Verwendung von zwei oder mehreren Techniken, um Dinge sichtbar zu machen, z. B. verschiedene Kontrastmittel oder MRT, CT und Ultraschall als Untersuchungsmethoden.

environment. Gas-vesiculate photosynthetic cyanobacteria, or the extremely halophilic archaeon *Halobacterium salinarum*, float with gas vesicles towards the surface. The gas vesicle shell consists of two Gvp proteins only, but ten additional Gvp proteins are required to form these spindle- or cylinder-shaped nanostructures. Gas vesicles scatter waves like light or ultrasound. They can easily be isolated and applied as novel contrast agent for ultrasound imaging or used as acoustic biosensors. The properties of gas vesicles can be modulated by altering the surface protein GvpC. A fusion of GvpC with peptides of bacterial or viral pathogens results in decorated gas vesicles that are used as effective antigen display system for vaccination.

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen ehemaligen Mitarbeitern für ihre engagierte Arbeit an Gasvesikeln, und D. Bollschweiler und H. Engelhardt, MPI für Biochemie, für ihre Analysen von GV über Cryo-Elektronentomographie. Die Arbeiten wurden von der DFG gefördert (PF 165/15-1).

Schlagworte

Halobacterium, *Microcystis*, Gasvesikelaufbau, Kontrastmittel, Ultraschall, Antigen-Display-System

Literatur

- [1] A. E. Walsby (1994). Gas vesicles. *Microbiol. Reviews* 58, 94–144.
- [2] F. Pfeifer (2012). Distribution, formation and regulation of gas vesicles. *Nat. Rev. Microbiol.* 10, 705–715, <https://doi.org/10.1038/nrmicro2834>.
- [3] N. Li, M. C. Cannon (1998). Gas vesicle genes identified in *Bacillus megaterium* and functional expression in *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.* 180, 2450–2458.
- [4] Y. Tashiro et al. (2016). Molecular genetic and physical analysis of gas vesicles in buoyant enterobacteria. *Environ. Microbiol.* 18, 1264–1276, doi: 10.1111/1462-2920.13203.
- [5] R. Knitsch et al. (2017). Mutations in the major gas vesicle protein GvpA and impacts on gas vesicle formation in *Haloflex volcanii*. *Mol. Microbiol.* 106, 530–542, doi: 10.1111/mmi.13833.
- [6] F. Pfeifer (2022). Recent advances in the study of gas vesicle proteins and application of gas vesicles in biomedical research. *Life* 12, 1455, <https://doi.org/10.3390/life12091455>.
- [7] S. Offner et al. (2000). Eight of fourteen *gvp* genes are sufficient for formation of gas vesicles in halophilic archaea. *J. Bacteriol.* 182, 4328–4336.
- [8] R. Kinsman, P. K. Hayes (1997). Genes encoding proteins homologous to halobacterial Gvps N, J, K, F & L are located downstream of *gvpC* in the cyanobacterium *Anabaena flos-aquae*. *DNA Seq.* 7, 97–106.
- [9] S. T. Huber et al. (2022). Cryo-EM structure of gas vesicles for buoyancy-controlled motility. *bioRxiv preprint* <https://doi.org/10.1101/2022.05.08.489936>.
- [10] P. Dutka et al. (2022). Structure of *Anabaena flos-aquae* gas vesicles revealed by cryo-ET. *bioRxiv preprint* <https://doi.org/10.1101/2022.06.21.496981>.
- [11] S. DasSarma, P. DasSarma (2015). Gas vesicle nanoparticles for antigen display. *Vaccines* 3, 686–702, <https://doi.org/10.3390/vaccines3030686>.
- [12] M. G. Shapiro et al. (2014). Biogenic gas nanostructures as ultrasonic molecular reporters. *Nat. Nanotech.* 9, 311–316.
- [13] M. Wei et al. (2022). Biosynthetic gas vesicles from Halobacteria NRC-1: A potential ultrasound contrast agent from tumor imaging. *Pharmaceutics* 14, 1198, <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14061198>.
- [14] A. Lakshmanan et al. (2016). Molecular engineering of acoustic protein nanostructures. *ACS Nano* 10, 7314–7322, doi: 10.1021/acsnano.6b03364.
- [15] A. Lakshmanan et al. (2020). Acoustic biosensors for ultrasound imaging of enzyme activity. *Nat. Chem. Biol.* 16, 988–996, <https://doi.org/10.1038/s41589-020-0591-0>.
- [16] H. Long et al. (2021). Non-modified ultrasound-responsive gas vesicles from *Microcystis* with targeted tumor accumulation. *Int. J. Nanomed.* 16, 8405–8416.

Verfasst von:



Felicitas Pfeifer studierte Biologie und promovierte an der Universität Würzburg. Postdoc-Aufenthalte in San Francisco und am MPI für Biochemie in Martinsried; Habilitation an der LMU München im Fach Mikrobiologie. 1994–2020 Professorin für Mikrobiologie an der TU Darmstadt, wo sie sich derzeit noch als Forschungsmentorin engagiert. Sie ist Mitglied des Editorial Boards der *BiUZ* und seit 2014 Sprecherin der biowissenschaftlichen Fachgesellschaften im VBIO.

Korrespondenz

Prof. Dr. Felicitas Pfeifer
Microbiology and Archaea
TU Darmstadt
Schnittspahnstrasse 10, 64287 Darmstadt
Email: pfeifer@bio.tu-darmstadt.de

HANDREICHUNG FÜR RASSISMUSKRITISCHE BILDUNGSARBEIT

Anlässlich des Internationalen Tags gegen Rassismus am 21. März 2023 veröffentlichte das Thüringer Ministerium für Bildung, Jugend und Sport (TMBJS) eine Handreichung für Thüringer Schulen zur Anwendung der Jenaer Erklärung im Unterricht. Die Publikation der Autoren Karl Porges und Uwe Hoßfeld von der AG Biologiedidaktik der Friedrich-Schiller-Universität Jena ist ein konkretes inhaltliches Angebot für rassismuskritische Bildungsarbeit an Thüringer Schulen. Sie steht ab sofort als Download zur Verfügung und kann beim TMBJS auch als Druckwerk bestellt werden. Zentraler Inhalt der Jenaer Erklärung von 2019 ist, dass es für die Verwendung des Begriffs der „Rasse“ im Zusammenhang mit menschlichen Gruppen keine biologische Begründung gibt: „Das Konzept der Rasse ist das Ergebnis von Rassismus und nicht dessen Voraussetzung“ (Jenaer Erklärung). Auf dem Klappentext der Handreichung

heißt es: „Das Konzept der „Rasse“, auf den Menschen übertragen, gilt seit langem als wissenschaftlich überholt. Dennoch ist Rassismus ein alltägliches



Problem. Rassentheorien wurden noch bis Anfang des 21. Jahrhunderts in den Schulen vermittelt und sind daher in den Köpfen vieler Menschen verwurzelt. Aktiv gegen jegliche Form des Rassismus und Diskriminierung in den Schulen zu wirken, ist daher eine Verpflichtung für alle an Bildung Beteiligte. Schließlich finden sich auch in den Beschlüssen und Veröffentlichungen der Kultusministerkonferenz Elemente, die eine rassismuskritische Bildungsarbeit fordern. Die vorliegende Broschüre mit dem Titel „Die Jenaer Erklärung gegen Rassismus“ und ihre Anwendung im Unterricht“ knüpft daran an, greift den wissenschaftlichen Kenntnisstand auf und bietet Hilfestellungen für Lehrkräfte, das Konzept „menschliche Rassen“ sachrichtig zu widerlegen.“ Weitere Informationen zur Handreichung unter <https://bildung.thueringen.de/aktuell/rasse-ist-kein-wissenschaftlicher-begriff-handreichung-fuer-thueringer-schulen>



ABB. 1 Die auch in Deutschland verbreitete Grüne Samtschnecke (*Elysia viridis*, hier auf *Bryopsis hypnoides*) ist ein Modellorganismus zur Erforschung der funktionalen Kleptoplastie in Sacoglossa. Foto: C. Brandao.

Schnecken, die gerne Algen wären?

Funktionale Kleptoplastie in Meeresnacktschnecken

KATARINA KODŽOMAN | JENNY MELO CLAVIJO | CORINNA SICKINGER | GREGOR CHRISTA

Mutualistische Symbiosen spielen eine entscheidende Rolle in der organismischen Evolution. Eine spezielle Form dieser Symbiose ist die Photosymbiose, bei der heterotrophe Organismen mit phototrophen Organismen eine Gemeinschaft bilden. Derartige Photosymbiosen sind im Tierreich relativ weit verbreitet, die Symbiose von Korallen mit einzelligen Algen ist jedoch vermutlich das bekannteste Beispiel. Innerhalb des Tierreiches gibt es jedoch Meeresnacktschnecken, die Sacoglossa, in denen eine ganz eigene Art der Photosymbiose evolvierte, die die Grenze zwischen Tieren und Pflanzen verwischen lässt: die funktionale Kleptoplastie.

Die Evolution der oxygenen Photosynthese wird allgemein als Meilenstein in der Entwicklung des Lebens angesehen. Allerdings kommt oxygene Photosynthese nur in Bakterien, Algen und höheren Pflanzen vor – Tiere sind nicht in der Lage Photosynthese zu betreiben. Durch eine Symbiose mit einzelligen Algen oder Cyanobakterien können aber auch Tiere die Vorteile der Photosynthese nutzen [1]. Diese Symbiose wird Photosymbiose genannt, bei der die Symbionten als Photobionten bezeichnet werden. Der tierische Wirt schützt die Photobionten vor Fraßfeinden, extremen abiotischen Bedingungen (z. B. starke Licht- oder UV-Strahlung) und stellt

Ammonium und CO₂ zur Verfügung, um eine hohe Photosyntheserate der Symbionten zu ermöglichen. Die Photobionten versorgen den Wirt im Gegenzug mit Photosyntheseprodukten, z. B. Glukose oder Aminosäuren [2]. Dieser (Nährstoff-)Austausch ist die Basis einer stabilen Photosymbiose, so dass eine Unterbrechung zum Beenden der Symbiose führen kann.

Photosymbiose kommt innerhalb der Metazoa in Schwämmen, Nesseltieren, Weichtieren, „Würmern“ und einigen wenigen Amphibien vor [2, 3]. Als Photobionten dienen vor allem Algen der Symbiodiniaceae (Fensome, Taylor, Norris, Sarjeant, Wharton & Williams, 1993),

Chlorella (M. Beijernick, 1890) oder Cyanobacteria (Stanier ex Cavalier-Smith, 2002) [3]. Eine besondere Form der Photosymbiose kommt in Arten der Schlundsackschnecken (Sacoglossa, von Ihering, 1876) vor. Diese marinen Nacktschnecken verwischen die Grenze zwischen Algen und Tieren, indem sie ausschließlich die Chloroplasten ihrer Nahrungsalgen in ihr eigenes Cytosol einlagern. Diese Chloroplasten bleiben im Cytosol einiger Schneckenarten über Monate hinweg photosynthetisch aktiv. Da es sich hier nur um Organellen handelt und nicht um einen gesamten Organismus, werden die Chloroplasten in den Schnecken als Kleptoplasten (gestohlene Plastiden) und der Vorgang des Einlagerns photosynthetisch aktiver Plastiden als funktionale Kleptoplastie bezeichnet. Innerhalb des Tierreichs ist die Kleptoplastie ansonsten bislang nur in zwei Arten von Mikroturbellaria beschrieben, die diese fremden Organellen aber nicht funktional halten können [4]. Die Sacoglossa sind in dieser Hinsicht einzigartig.

Evolution der funktionalen Kleptoplastie in Sacoglossa

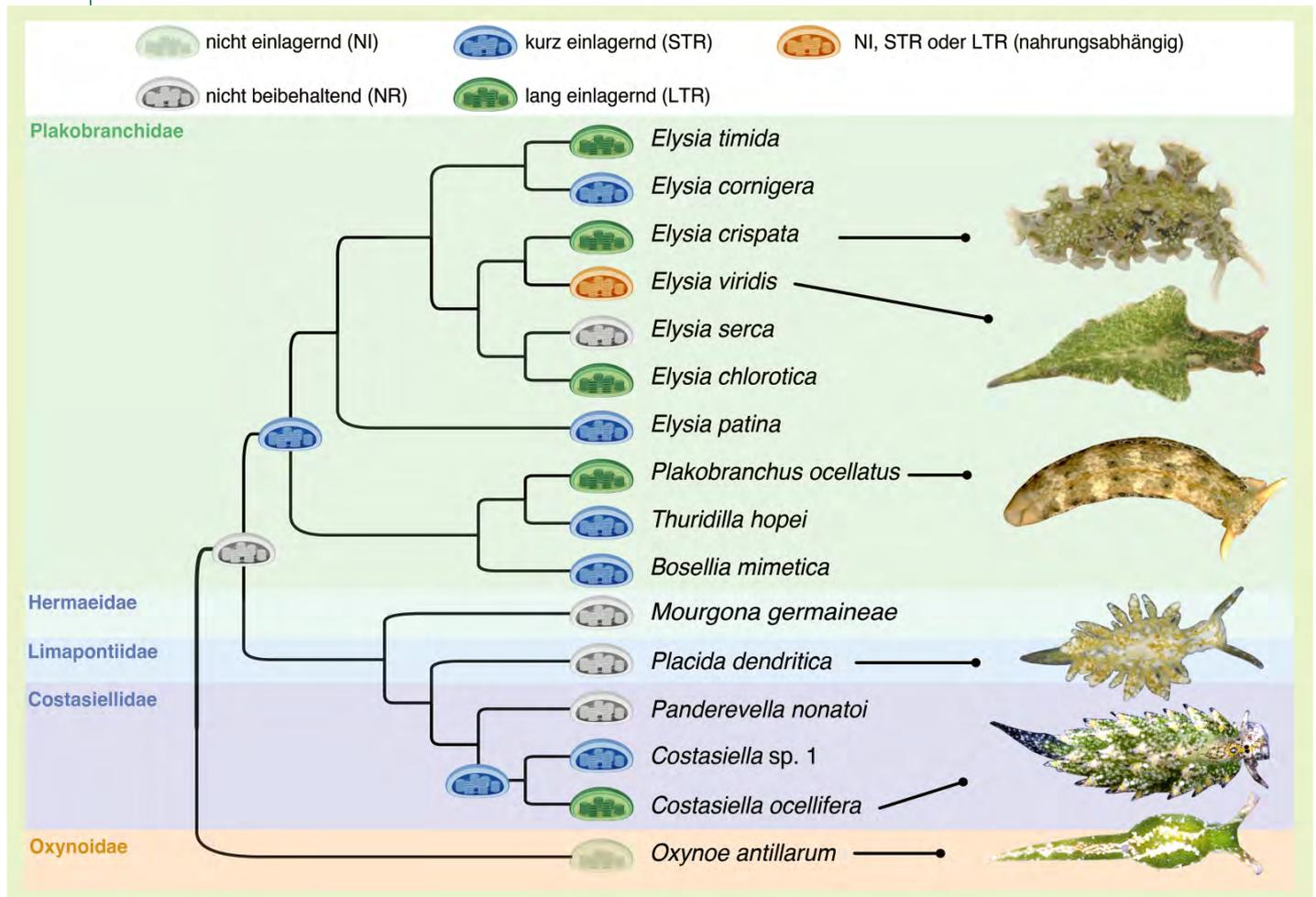
Sacoglossa gehören zu den Heterobranchia (Verschiedenkiemer), zu denen auch die Landlungenschnecken (Stylommatophora) zählen. Gemeinsam mit den Siphonarioidea und den Amphiboloidea bilden die Stylommatophora die Gruppe der Pneumopulmonata, die das Schwester-taxon der Sacoglossa bilden und als Pan-Pulmonata bezeichnet werden [5]. Dieses Verwandtschaftsverhältnis hat die traditionelle Einteilung in Hinterkiemerschnecken („Opisthobranchia“) abgelöst, die jedoch oftmals noch – fälschlicherweise – verwendet wird. Bislang sind 500 Arten der Sacoglossa beschrieben, von denen ca. 5 Arten auch in Deutschland vorkommen, unter anderem *Elysia viridis* (Abbildung 1), an der eine Vielzahl von Studien zur funktionalen Kleptoplastie durchgeführt wurden. Die meisten Arten der Sacoglossa erreichen Größen von bis zu 1 cm (nur wenige werden mit bis zu 7–8 cm deutlich größer), wovon viele grünlich gefärbt sind. Generell können die Sacoglossa in zwei große Gruppen eingeteilt werden: die beschalten Oxynooidea (Stoliczka, 1868 (1847)) sowie die nicht-beschalten, welche aus den Plakobranchoidea (Gray, 1840) und den Platyhedyloidea (Salvini-Plawen, 1973) bestehen. Die Plakobranchoidea können nochmals grob in Cerata-tragende und Parkpodien-tragende Familien unterteilt werden (Abbildung 2, Cerata = dorsale röhrenförmige Anhänge, Parkpodien = laterale Erweiterungen des Fußes).

Die namensgebende Struktur der Sacoglossa ist der sogenannte Ascus, eine Autapomorphie der Sacoglossa, in dem alte Zähne der Radula aufbewahrt werden (Abbildung 3a). Im Gegensatz zu anderen Mollusken, ist die Radula der Sacoglossa modifiziert. Einzelne Zähne liegen aufgereiht vor, und nur ein Zahn, der Leitzahn, wird zur Nahrungsaufnahme verwendet (Abbildung 3 a–c). Mit wenigen Ausnahmen ernähren sich Sacoglossa von Makro-

algen, insbesondere von Grünalgen der Klasse Ulvophyceae (Stewart & Mattox, 1978). Viele Arten der Sacoglossa sind stenophag (Nahrungsspezialisten) und nur einige wenige ernähren sich polyphag (breites Nahrungsspektrum). Diese Nahrungsspezialität resultiert unter anderem aus der morphologischen Anpassung der Radula an die Beschaffenheit der Zellwand der jeweiligen Nahrungsalge [6]. Generell sägen oder stechen die Sacoglossa mittels des Leitzahns ein Loch in die Zellwand der Nahrungsalgen und saugen anschließend das Cytosol auf. Bei den Oxynooidea kommt es zur Verdauung sämtlicher Bestandteile des aufgenommenen Algencytosols. Demnach werden sie in Hinblick auf die funktionale Kleptoplastie als nicht-einlagernde Arten (*non-incorporation*; NI) bezeichnet (Abbildung 2). Innerhalb der Plakobranchoidea ist die Fähigkeit evolviert, spezifisch die Chloroplasten aus dem aufgenommenen Algencytosol in die Epithelzellen der Mitteldarmdrüse (MDD) zu phagozytieren. Die MDD ist, abhängig von der Art, stark verzweigt und zieht sich durch den gesamten Körper. Nachdem die Chloroplasten in die MDD aufgenommen wurden, spricht man von Kleptoplasten. Diese sind in den meisten Arten der Sacoglossa jedoch nicht photosynthetisch aktiv und werden innerhalb weniger Stunden oder Tage verdaut. Diese Arten werden als nicht-beibehaltend (*non-retention*; NR) bezeichnet. Innerhalb der Plakobranchoidea ist unabhängig voneinander in den Costasiellidae und in den Plakobranchoidea die Fähigkeit entstanden, photosynthetisch aktive Kleptoplasten in die MDD einzulagern (Abbildung 2). Dabei unterscheidet man Arten, in denen die Kleptoplasten bis zu zwei Wochen (*short-term-retention*; STR) oder mehrere Monate (*long-term-retention*; LTR) photosynthetisch aktiv bleiben. Fast alle einlagernden Sacoglossa sind STR-Arten, und nur in fünf Arten evolvierte, erneut unabhängig voneinander,

IN KÜRZE

- Einige Sacoglossa sind in der Lage, Chloroplasten ihrer Nahrungsalge in ihr eigenes Cytosol **einzulagern und photosynthetisch aktiv** zu halten. Dies wird als funktionale Kleptoplastie bezeichnet.
- Die **molekularen Grundlagen** der Plastidenanglebigkeit in den Sacoglossa sind noch wenig verstanden.
- Lange wurde ein Gentransfer von den Kleptoplasten zur Schnecke vermutet. Neuere Daten **schließen einen Gentransfer aber zweifelsfrei aus**.
- Der Nutzen, den Sacoglossa aus den Kleptoplasten ziehen können, ist vermutlich weniger bedeutend als bisher angenommen. **Autophagie** in Kombination mit **angereicherten Photosyntheseprodukten** scheinen die **Langlebigkeit** der Schnecken auszumachen.
- Die Art *Elysia viridis* (Montagu, 1804) stellt einen guten **Modellorganismus** dar, um die funktionale Kleptoplastie in Sacoglossa weiter zu erforschen, da sie, abhängig vom Sammelort und der Nahrung, entweder als NI-, STR- oder LTR-Art gilt.

ABB. 2 | EVOLUTION DER FUNKTIONALEN KLEPTOPLASTIE IN SACOGLOSSA


Die Phylogenie basiert auf [6]. Hergestellt mit BioRender.com, Fotos: G. Christa.

die Fähigkeit zur LTR (Abbildung 2): *Costasiella ocellifera* (Simroth, 1895), *Elysia timida* (Risso, 1818), *Elysia crispata* (Mörch, 1863), *Elysia chlorotica* (Gould, 1870) und *Plakobranchus ocellatus* (van Hasselt, 1824) [7]. Eine besondere Stellung nimmt *Elysia viridis* (Montagu, 1804) ein, die abhängig vom Sammelort und der Nahrung entweder als NI-, STR- oder LTR-Art gilt.

Molekulare Grundlagen der funktionalen Kleptoplastie

In Hinblick auf die Fähigkeit der Schnecken die Chloroplasten zu erkennen, in das eigene Cytosol aufzunehmen und sie dort funktional zu halten, sind noch viele Fragen offen. Insbesondere die molekularen Grundlagen der Langlebigkeit der Plastiden in den Schnecken sind noch weitestgehend unbekannt. Dabei gilt es zwischen Adaptationen, die die Schnecken evolvierten und intrinsischen Adaptationen, die die Chloroplasten mitbringen, zu unterscheiden. Neuere Daten geben Hinweise darauf, dass die Schnecken ähnliche molekulare Mechanismen zur Erkennung

der Chloroplasten verwenden, wie es bereits von Nesseltieren in der Erkennung der Symbiodiniaceae bekannt ist [8, 9]. Besonders die Mustererkennungsrezeptoren (*pattern recognition receptors*, PRR) des angeborenen Immunsystems scheinen eine grundsätzlich wichtige Funktion in der Erkennung von Photosymbionten einzunehmen. Homologe dieser Rezeptoren, z. B. Scavenger Receptor B (SCRIB), Scavenger Receptor E-like (SCRE), C-type Lectine und Thrombospondin-type-1 Repeat-Proteine (TSRs), wurden in Sacoglossa nachgewiesen. Die Expression dieser Gene steht folglich in einem Zusammenhang mit dem Erkennen der Chloroplasten (Abbildung 4A) [8]. Somit erkennen homologe Rezeptoren der Tiere taxonomisch nicht näher verwandte Symbionten bzw. nur die Organellen. Der Mechanismus zur Erkennung der Symbionten hat daher vermutlich einen stammesgeschichtlichen Ursprung, so dass die Schnecken keine oder nur wenige evolutionäre Innovationen benötigen, um die Chloroplasten zu erkennen. Der Schritt von der extrazellulären Verdauung der Oxynoidea hin zu der Einlagerung

könnte mit der Verzweigung der MDD in den Plakobranchoidea einhergehen, die es den Tieren ermöglichte, auf einer großen Fläche Symbionten zu erkennen und einzulagern, sowie mit dem Verlust der lichtblockierenden Schale, was zur Beibehaltung der photosynthetischen Aktivität der Chloroplasten beitragen kann.

Eine wichtige Schutzfunktion des angeborenen Immunsystems ist die Erkennung von fremden Organismen und die Unterscheidung zwischen Symbiont oder Pathogen. In wirbellosen Tieren gehen dieser Unterscheidung Signalwege voraus, unter anderem der TGF- β -Signalweg. In einigen Nesseltieren führt dieser Signalweg zu einer Unterdrückung der Immunantwort, wodurch die Photobionten beibehalten werden [10]. In den Sacoglossa sind einige Bestandteile des TGF- β -Signalweges nicht im Genom kodiert oder entsprechende Gene werden während des Erkennungsprozesses nicht exprimiert. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass dieser Signalweg in den Schnecken keine Rolle bei der Beibehaltung der Kleptoplasten spielt (Abbildung 4B). Derzeit ist unbekannt, ob und welche anderen Signalkaskaden zu einer möglichen Immunsuppression in den Schnecken führen könnten.

Nach der Erkennung der Chloroplasten und der Phagozytose sind die Kleptoplasten von einer phagosomalen Membran umgeben (Abbildung 4C). Damit die Kleptoplasten anschließend nicht intrazellulär verdaut werden, wie es bei den NR-Arten der Fall ist, ist die Inhibierung der Phagosomenreifung entscheidend. Eine Möglichkeit besteht darin, die Bindung bestimmter Proteine der Rab- (*Ras-related in brain*)-Familie an das Phagosom zu verhindern, um eine Reifung zu unterdrücken [11]. Wichtig dafür wäre eine permanente Bindung von Rab5 an das Phagosom sowie das Vorhandensein von Nährstofftransportern, z. B. Ammoniumtransporter oder Glukosetransporter, damit eine stabile funktionale Kleptoplastie entstehen kann (Abbildung 4D). Hier gibt es noch viele Unsicherheiten. Beispielsweise konnte bislang nicht gezeigt werden, ob Rab5 an das Phagosom bindet und welche Nährstofftransporter vorhanden sind.

Für eine stabile Photosymbiose ist es zudem wichtig, dass schädliche Abbauprodukte des Photobionten schnell und effizient entgiftet werden können – insbesondere reaktive Sauerstoffspezies (ROS), deren Bildung durch Lichtstress induziert wird. In LTR-Sacoglossa werden Antioxidantien während Hungerphasen hochreguliert. Jedoch ist unklar, ob dies aufgrund erhöhter ROS-Bildung durch die Kleptoplasten erfolgt (Abbildung 4E) [12]. Die entstehenden ROS könnten Signalkaskaden auslösen, die zur Verdauung der Kleptoplasten führen. Dies kann durch eine Ablösung von Rab5 durch Rab7 geschehen – ob dies in den Schnecken tatsächlich passiert, ist noch nicht bekannt. Allerdings wurde eine erhöhte Abundanz von Lysosomen in hungergestressten Tieren gezeigt, die in der Folge durch Fusion mit den Phagosomen Autolysosomen bilden und so die degradierten Kleptoplasten verdauen

können [13]. Besonders wichtig wird es in Zukunft sein, vermehrt NR-Arten zu untersuchen, um NR, STR und LTR vergleichen und so die molekulare Evolution der funktionalen Kleptoplastie in Sacoglossa rekonstruieren zu können. Zudem rücken intrinsische Adaptationen der Kleptoplasten in den Vordergrund.

Besondere Chloroplasten?

Chloroplasten benötigen mehr als 2000 im Kerngenom kodierte Proteine, um ihre Funktion aufrechterhalten zu können. In den Sacoglossa liegen die Kleptoplasten allerdings isoliert von ihrem ursprünglichen Wirtsgenom vor. Daher müssen Erklärungen gefunden werden, wie die Kleptoplasten dennoch mehrere Wochen bis Monate innerhalb des Cytosols der Schnecken photosynthetisch aktiv bleiben können. Als eine mögliche Erklärung galt lange ein Gentransfer von der Alge zur Schnecke. Theoretisch hätte dieser zumindest die erforderlichen Gene zur Beibehaltung der photosynthetischen Aktivität liefern können, jedoch nur, wenn eine große Anzahl an Genen transferiert worden wäre. Frühere Ergebnisse haben lediglich einen solchen Transfer von einzelnen Genen unterstützt, aber auch diese wurden bereits nach kurzer Zeit als Artefakte identifiziert und verworfen [14]. Mit zunehmenden genomischen Daten konnte innerhalb der letzten zehn Jahre zweifelsfrei bewiesen werden, dass es keinen Gentransfer von den Algen zu den Schnecken gab. Aber wie können die Kleptoplasten dennoch so lange ihre photosynthetische Aktivität beibehalten?

Hierfür haben besonders Photoschutzmechanismen das Potenzial eine entscheidende Rolle einzunehmen. Photoschutzmechanismen verhindern oder reparieren Schäden des Photosystem II (PSII), besonders am zentralen D1-Protein, die durch exzessive Lichtenergie induziert wurden. Ein wichtiger Photoschutzmechanismus ist unter dem Mechanismus des Nicht-photochemischen-Quenchings (NPQ) zusammengefasst. NPQ besteht unter anderem aus dem Xanthophyll-Zyklus (XC) und dem Hochenergie-Quenching (qE) [15]. Interessanterweise sind die zu den Ulvophyceae gehörenden Bryopsidales, die oftmals als Nahrungsalgen der Sacoglossa dienen, defizient in diesen beiden Komponenten des NPQ. Die exakten Mechanismen zum Schutz vor exzessiven Lichtintensitäten werden in diesen Algen noch weiter untersucht [16]. Unabhängig von den Schutzmechanismen kommt es dennoch zu Schäden an D1, wenn auch in vermindertem Maße. Damit das PSII weiterhin arbeiten kann, muss das geschädigte D1-Protein ersetzt werden, um eine dauerhafte Inhibierung der Photosynthese zu verhindern (Photoinhibition). Involviert in diesem als D1-Turnover bezeichneten Vorgang ist FtsH (*Filamentous temperature sensitive H*), welches das geschädigte D1 aus dem PSII löst und somit den Weg für ein neues D1 öffnet [16]. FtsH und das D1-Protein (PSBA) sind in den Ulvophyceae im Chloroplasten kodiert. Die Kleptoplasten besitzen somit ihr eigenes Reparaturkit. Es gibt Hinweise dafür, dass der D1-Turnover

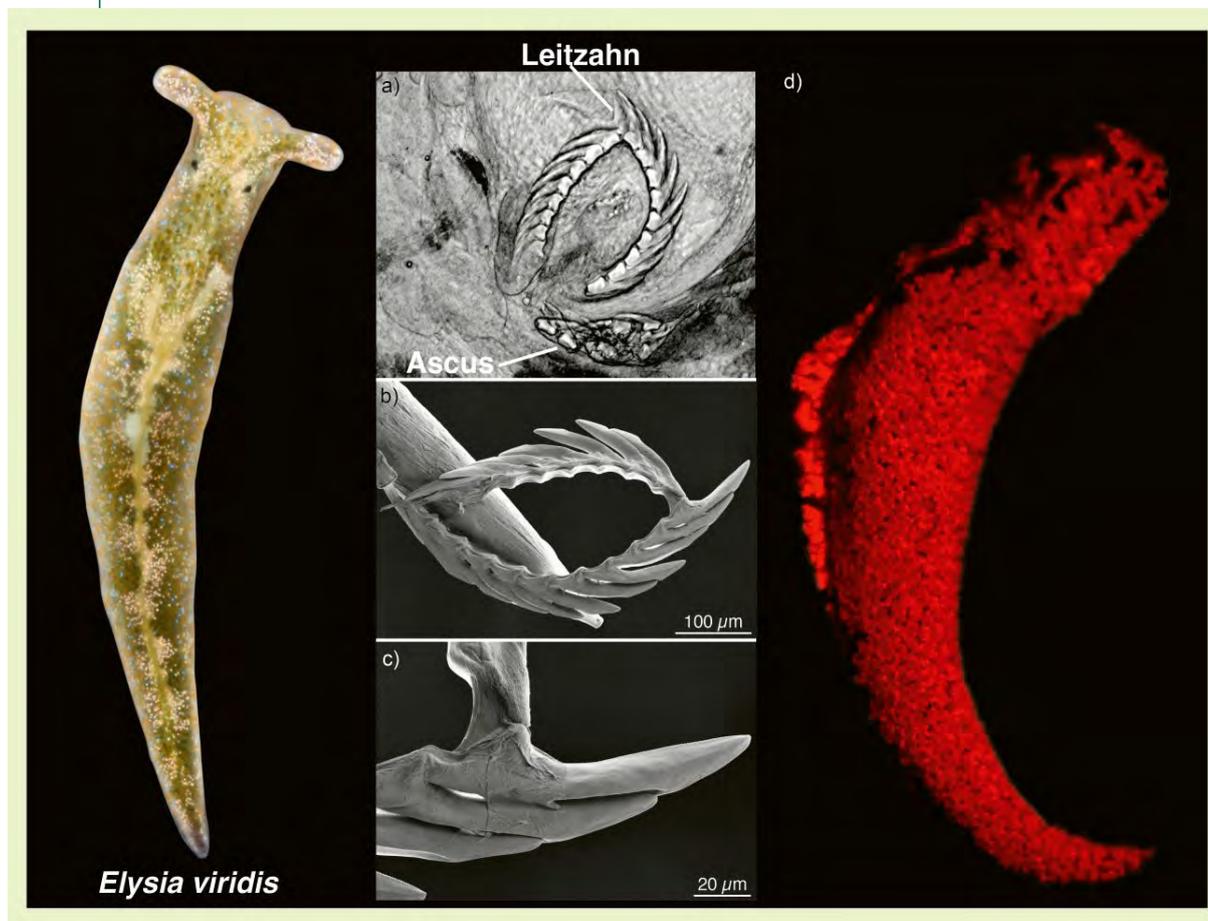
in den Kleptoplasten in einigen Schnecken während des Hungerns aufrechterhalten werden kann und somit mitunter fehlende Schutzmechanismen kompensieren kann [17]. Dies wäre eine wichtige Voraussetzung für die Schnecken, um überhaupt funktionale Kleptoplasten besitzen zu können. Aber welchen Vorteil haben die Schnecken von der funktionalen Kleptoplastie?

Nahrungsphysiologische Vorteile sind umstritten

In früheren Arbeiten wurden die Schnecken oft als phototroph oder sogar als autophototroph bezeichnet. Es wurde sogar behauptet, dass einige Schnecken aufgrund der photosynthetisch aktiven Kleptoplasten ihren Körper nachwachsen lassen können [18]. Mit diesen und ähnlichen Aussagen wird impliziert, dass die Schnecken aktiv und in großem Maße von den Kleptoplasten profitieren können. Jedoch gibt es dabei noch viele Unklarheiten. Traditionell werden die Schnecken hungern gelassen, um den Nutzen der Kleptoplasten zu untersuchen.

Dabei werden die Versuchstiere meist im Vergleich zwischen Licht- (= mit Photosynthese) und Dunkelbedingungen (= ohne Photosynthese) untersucht. In vielen Studien wurde gezeigt, dass die Tiere im Dunkeln ihre Biomasse schneller verlieren [19]. Dies wurde als Beweis genommen, dass photosynthetisch aktive Kleptoplasten einen physiologischen Vorteil für die Schnecke bieten. Allerdings wird hierbei oftmals wenig beachtet, dass Dunkelheit den Metabolismus der Tiere beeinflussen kann, was über das Ausschalten der Photosynthese hinausgeht. Zudem wird auch häufig vernachlässigt, dass die Schnecken im Licht auch im erheblichen Maße an Biomasse einbüßen und die Reproduktion verringert ist. Schätzungen gehen davon aus, dass die Kleptoplasten den Schnecken lediglich zwischen 1–60 Prozent der benötigten Energie zur Verfügung stellen können, was wiederum die beobachteten Ergebnisse gut erklären könnte [20]. Der Unterschied im Energiegewinn zwischen Dunkel- und Lichtbedingungen ist somit im Verhältnis gering. Im Vergleich mit anderen photosymbiotischen Tieren

ABB. 3 | DER MODELLORGANISMUS *ELYSIA VIRIDIS*



Übersicht über die Radula und des Ascus mittels Lichtmikroskopie (a) sowie Transelektronen-Mikroskop-Aufnahme der Radula in Übersicht (b) und des Leitzahns als Detailaufnahme (c). Mit dem Leitzahn wird die Zellwand der Algen aufgestochen, um anschließend das Cytosol und die Chloroplasten einsaugen zu können. Übersicht über die Chlorophyllfluoreszenz in *E. viridis* (d). Fotos: G. Christa.

wie Korallen und Riesenmuscheln, die ihre Nahrung vollständig durch die Symbionten decken können, ist der Energiegewinn sogar nochmals deutlich geringer.

Ein weiteres Problem besteht darin zu bestimmen, wie die Sacoglossa die Photosyntheseprodukte erhalten. Eine Möglichkeit wäre ein aktiver Export durch die Kleptoplasten in das Cytosol der Schnecken, eine andere die Verdauung der Kleptoplasten [13]. Das System wird noch zusätzlich verkompliziert, da zwischen fressenden und hungrigen Schnecken unterschieden werden muss. Während die Schnecken fressen, werden die Kleptoplasten entweder kontinuierlich verdaut oder ältere, bereits phagozytierte Kleptoplasten werden ausgetauscht [21]. Die Unterscheidung dieser beiden Vorgänge ist schwierig. Da jedoch durch radioaktives Markieren der Einbau von Assimilaten der Kleptoplasten in einigen Produkten der Schnecken (z. B. Mukus) nachgewiesen wurde [22], ist die Verdauung der Kleptoplasten sehr wahrscheinlich. Wird einigen Arten jedoch die Nahrung entzogen, wird der Verdauung zumindest reduziert. Die Schnecken sterben sogar eher, als dass die Kleptoplasten vollständig verdaut werden. Dennoch gibt es bisher keine zufriedenstellende Antwort auf die Frage, wie die Schnecken an die Photosyntheseprodukte der Kleptoplasten kommen. Indizien deuten eher auf eine verlangsamte Verdauung der Kleptoplasten zum Nahrungserwerb hin – zumindest in Schnecken, die hungern. Es wurde gezeigt, dass in LTR-Schnecken die Kleptoplasten Stärke akkumulieren [23]. Bei einem aktiven Export würde man erwarten, dass die Schnecke kontinuierlich mit Assimilaten versorgt wird und diese nicht in den Kleptoplasten gespeichert werden. Eine Speicherung würde man nur dann erwarten können, wenn die Schnecken in eine Art Ruhezustand gehen. Tatsächlich wird die Aktivität vieler Gene in LTR-Schnecken während des Hungerns heruntergefahren; diese Tiere verlieren aber während des Hungerns an Biomasse [12]. Der Verlust der Biomasse basiert vermutlich auf Autophagie, die in bestimmten Schnecken während des Hungerns stark ansteigt und so vermutlich den Hauptprozess der Energiegewinnung ausmacht. Ein mit Stärke gefüllter Chloroplast wäre für diese Schnecken dann ein größerer Energiespeicher. Allerdings ist auch hier noch nicht geklärt, wie die Schnecken dann in der Lage sind, die Stärke intrazellulär abzubauen. Zudem verringert sich die Akkumulation der Stärke in den Chloroplasten nach ca. 50 Hungertagen wieder. Woran dies liegt, ist unbekannt. Es ist jedoch eher unwahrscheinlich, dass die Kleptoplasten erst nach einer bestimmten Zeit anfangen, Stärke abzubauen und dann zu exportieren. Es gibt Hinweise darauf, dass die Kleptoplasten intrazellulär abgebaut werden und dadurch die frei werdende Stärke zur Verfügung stünde [13]. Wie und ob die Stärke dann abgebaut werden kann, ist noch unklar.

Elysia viridis als Modellorganismus

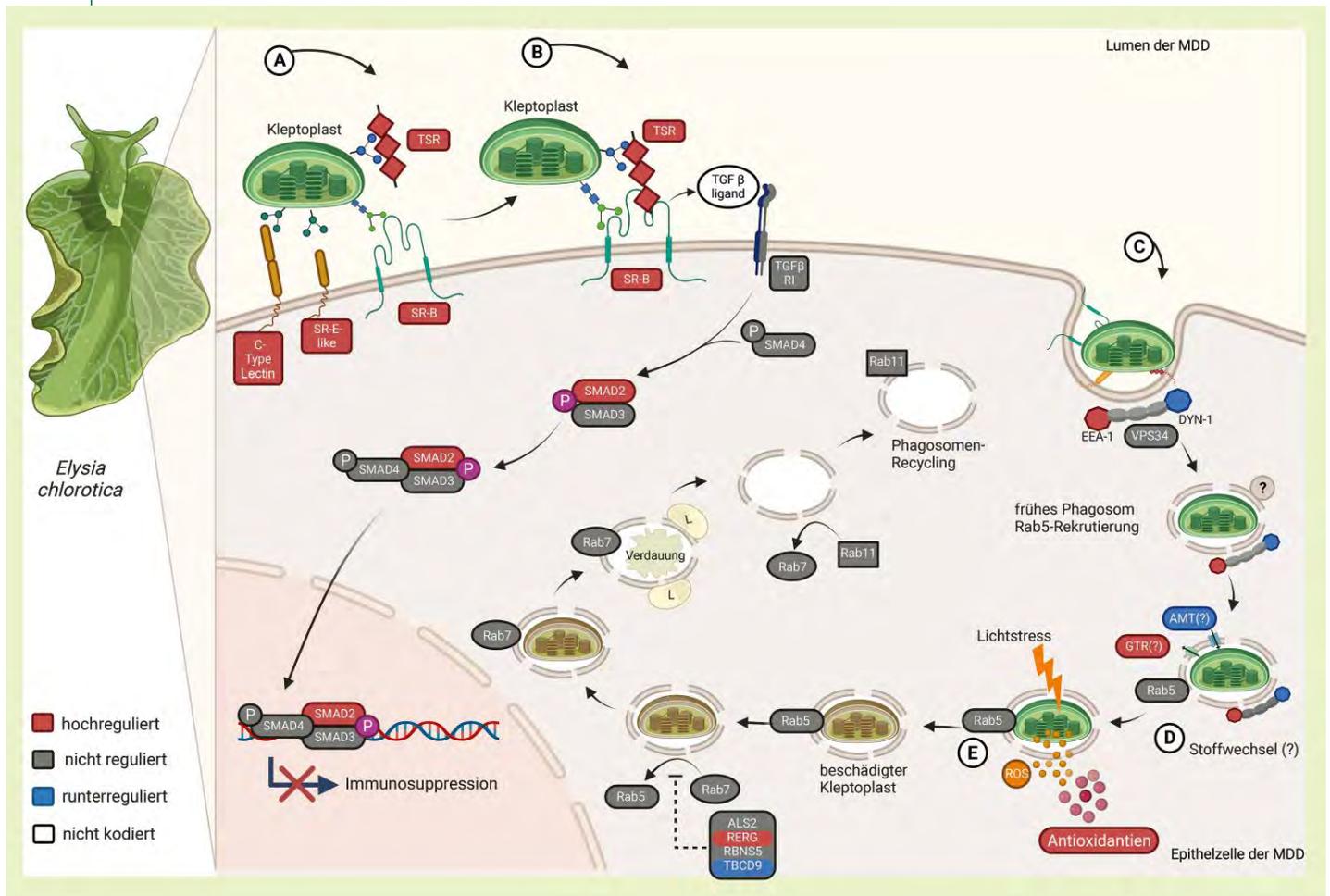
Viele der noch offenen Fragen sind schwer zu beantworten. Vergleiche zwischen kleptoplastenfreien und klepto-

plastenträgenden Arten können zwar helfen, grundlegende Antworten zu finden, jedoch könnten alle erzielten Ergebnisse auch auf artspezifischen Eigenschaften beruhen und nicht auf dem Vorhandensein oder Fehlen der Kleptoplasten. Daher ist ein Vergleich innerhalb der gleichen Art zwischen Tieren mit und ohne Kleptoplasten notwendig. Dies war allerdings lange nicht möglich. Einen besonderen Stellenwert nimmt daher *Elysia viridis* ein. *Elysia viridis* ist in Europa vom Atlantik vor Norwegen bis nach Griechenland im Mittelmeer verbreitet und abhängig von der Nahrungsalge entweder eine NI-, STR- oder eine LTR-Art (Abbildung 2). Aktuelle Arbeiten an *Elysia viridis* konnten zeigen, dass Chloroplasten von *Cladophora* sp. (Kützing, 1843) nicht im Cytosol eingelagert werden können [24]. Da man im natürlichen Habitat Individuen an verschiedenen Nahrungsalgen finden kann, die auch verschiedene physiologische Eigenschaften haben, eignet sich *Elysia viridis* besonders gut, um den Einfluss und die Bedeutung der Chloroplasten für den Metabolismus zu verstehen. Traditionell durchgeführte Experimente im Dunkeln oder mittels eines chemischen Blockers entfallen und würden erzielte Ergebnisse dementsprechend nicht beeinflussen. Mittels *Elysia viridis* können daher die zentralen Fragen in der Forschung der funktionalen Kleptoplastie beantwortet werden.

Sacoglossa in der Schule als System der Endosymbiose

Nicht nur unter Forschenden, sondern auch unter wissenschaftlich Interessierten sorgen die „grünen“ Schnecken für Staunen. Unter anderem kann die Besonderheit der funktionalen Kleptoplastie und die Aktualität der Forschung auch in der Schule zur Sprache gebracht werden. Der Kernlehrplan bietet einige thematische Bezüge, um den Schüler/-innen diese besonderen Meeresnachtschnecken vorzustellen. Zum Beispiel könnten im Themenbereich der Symbiose, der Chloroplasten als pflanzliche Zellorganellen oder des Prozesses der Photosynthese, die Sacoglossa als spezielles System vorgestellt werden. Dies kann sowohl theoretisch als auch praktisch veranschaulicht werden. Eine Möglichkeit die Schnecken in die Schulen zu bringen, wäre in Form eines Aquariums. Gut geeignet ist dafür *Elysia timida*, da ihre relativ einfache Züchtung eine erfolgreiche Haltung ermöglicht, die mit nicht zu großem Arbeitsaufwand verbunden ist [25]. Die regelmäßige Pflege und Beobachtung der Schnecken kann arbeitsteilig durch eine Gruppe von Schüler/-innen im Rahmen einer AG übernommen werden. Auch für schulische Projekt- und Facharbeiten ist die funktionale Kleptoplastie ein sehr interessantes Thema, welches die Schüler/-innen in Form einer Zusammenfassung der aktuellen Forschungslage oder anhand von eigenen Untersuchungen an den Schnecken (beispielsweise während Hungerversuchen) erarbeiten können. Ein exemplarischer Blick in die Kernlehrpläne von Nordrhein-Westfalen (<https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene>)

ABB. 4 | MOLEKULARE MECHANISMEN DER KLEPTOPLASTIE



Gezeigt ist ein Modell der Expression von Genen (basierend auf Studien an *Elysia chlorotica*, *E. timida*, *E. cornigera* und *E. viridis*), die potenziell in der Erkennung und Beibehaltung der Kleptoplasten involviert sind. Details siehe Text. Hergestellt mit BioRender.com.

zeigt, dass die Kleptoplastie bei Sacoglossa auch im regulären Biologieunterricht Platz findet. In der Sekundarstufe I und II können die Schnecken im Thema Photosynthese als Tiere vorgestellt werden, die sich diesen Prozess auf außergewöhnliche Weise zunutze machen. Auch bei der Auseinandersetzung mit pflanzlichen Zellorganellen bietet sich eine Vertiefung der Chloroplasten als Kleptoplasten in Meeresnachtschnecken und ihrer Eigenschaften an. In diesem Zusammenhang lässt sich auch die Aufrechterhaltung der Photosyntheseaktivität in den Schnecken thematisieren, beispielsweise durch das Aufstellen von Hypothesen durch die Lernenden.

Darüber hinaus werden in NRW in der Oberstufe im Bereich der Ökologie (Inhaltsfeld 5) unterschiedliche Symbiosen behandelt, von denen die Kleptoplastie als besondere Art der Photosymbiose als Exkurs zum Thema behandelt werden kann. Anhand von bestehenden Daten können den Schüler/-innen Aufgaben gestellt werden, in denen die unterschiedlichen Retentionsformen, also die Einlagerungsdauer der Chloroplasten, erklärt werden.

Sind die Anschaffung und die Züchtung von Schnecken möglich, können an den schuleigenen Tieren Hungerversuche und die Beobachtung des Gewichtsverlustes dokumentiert werden. Anderenfalls können auch bereits bestehende Daten zur Photosyntheseaktivität während Hungerversuchen bei Sacoglossa verwendet werden, da die Messung der Photosyntheserate über Fluoreszenz den schulischen Rahmen sprengen würde.

Grundsätzlich bietet die funktionale Kleptoplastie in Meeresnachtschnecken ein großes Potenzial, um die schulischen Themen mit Aktualität und Alltagsnähe zu ergänzen und bei den Schüler/-innen Interesse für ökologische Phänomene und Fragestellungen sowie Hypothesenbildung zu wecken. Da die Schnecken unter anderem in der Küstenregion europäischer Urlaubsorte vorkommen, kann den Lernenden auch die Alltagsnähe zu den besonderen Schnecken verdeutlicht werden. Durch praktische Untersuchungen und Experimente wird zudem die Motivation zum Forschen und Entdecken geweckt und das experimentbezogene Selbstkonzept der Heranwachsenden gestärkt.

Zusammenfassung

Einige der 500 bekannten *Sacoglossa*-Arten können in ihrem eigenen Cytosol Chloroplasten photosynthetisch aktiv halten. Dieses als funktionale Kleptoplastie bezeichnete Phänomen ist eine spezielle Form der Photosymbiose und kommt in Tieren nur in *Sacoglossa* vor. Viele Fragen in Hinblick auf die benötigten Adaptationen der Schnecken und der Algen, um funktionale Kleptoplastie zu ermöglichen, sind entweder nur unzureichend oder noch nicht beantwortet. Besonders kontrovers wird der Nutzen der „gestohlenen Plastiden“ (Kleptoplasten) für die Schnecken diskutiert und wie die Schnecken die photosynthetisch fixierten Nährstoffe erhalten können. Hier könnte intensivere Forschung an *Elysia viridis* helfen, die auch plastidenfrei untersucht werden kann. Neben vielfältigen Forschungsfragen kann das Phänomen der funktionalen Kleptoplastie aber auch in der Schule, z. B. im Rahmen der Endosymbiose behandelt werden, um so bereits Schüler/-innen mit diesen faszinierenden Schnecken in Kontakt kommen zu lassen und die Faszination für die Biologie zu steigern.

Summary

Functional kleptoplasty in sea slugs

Some of the 500 known *Sacoglossa* species can keep chloroplasts photosynthetically active in their own cytosol. This phenomenon, called functional kleptoplasty, is a special form of photosymbiosis and is only found in *Sacoglossa* among animals. With regard to the necessary adaptations to enable functional kleptoplasty in these slugs many questions are either insufficiently answered or not at all. Especially the benefit of the “stolen plastids” (kleptoplasts) for the slugs is discussed controversially and how they can obtain the photosynthetically fixed nutrients. More intensive research on *Elysia viridis*, which can also be examined free of plastids, could help to answer some of these questions. In addition to various research questions, the phenomenon of functional kleptoplasty can also be implemented at school, e.g. in the context of endosymbiosis, in order to show these fascinating slugs to schoolchildren and increase their fascination for biology.

Schlagworte

Kleptoplastie, Photosymbiose, Meeresnacktschnecken, *Sacoglossa*, Chloroplasten

Literatur

- [1] A. A. Venn et al. (2008). Photosynthetic symbioses in animals. *J. Exp. Bot.* 59, 1069–80.
- [2] S. K. Davy et al. (2012). Cell biology of Cnidarian-Dinoflagellate symbiosis. *Micro. Mol. Biol. Rev.* 76, 229–61.
- [3] J. Melo Clavijo et al. (2018). Polymorphic adaptations in metazoans to establish and maintain photosymbioses. *Biol. Rev.* 9, 2006–20.
- [4] N. W. L. Van Steenkiste et al. (2019). A new case of kleptoplasty in animals: Marine flatworms steal functional plastids from diatoms. *Sci. Adv.* 5, eaaw4337.
- [5] P. Krug et al. (2022). Phylogenomic resolution of the root of Panpulmonata, a hyperdiverse radiation of gastropods: new insight into the evolution of air breathing. *Proc. R. Soc. B.* 289, 20211855.
- [6] K. R. Jensen (1994). Behavioural adaptations and diet specificity of sacoglossan opisthobranchs. *Ethol. Ecol. Evol.* 6, 87–101.
- [7] G. Christa et al. (2015). Phylogenetic evidence for multiple independent origins of functional kleptoplasty in *Sacoglossa* (Heterobranchia, Gastropoda). *Org. Divers. Evol.* 15, 23–36.
- [8] J. Melo Clavijo et al. (2020). Identification of scavenger receptors and thrombospondin-type-1 repeat proteins potentially relevant for plastid recognition in *Sacoglossa*. *Ecol. Evol.* 19, 12348–63.
- [9] C. X. Chan et al. (2018). Active host response to algal symbionts in the sea slug *Elysia chlorotica*. *Mol. Biol. Evol.* 35, 1706–11.
- [10] L. E. Fuess et al. (2020). Investigating the roles of transforming growth factor-beta in immune response of *Orbicella faveolata*, a scleractinian coral. *Dev. Comp. Immunol.* 107, 103639.
- [11] D. Fransolet et al. (2012). Establishment of endosymbiosis: The case of cnidarians and *Symbiodinium*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 420–421, 1–7.
- [12] J. de Vries et al. (2015). Comparison of sister species identifies factors underpinning plastid compatibility in green sea slugs. *Proc. R. Soc. B.* 282, 20142519.
- [13] E. M. J. Laetz et al. (2017). Examining the retention of functional kleptoplasts and digestive activity in sacoglossan sea slugs. *Org. Divers. Evol.* 17, 87–99.
- [14] C. Rauch et al. (2015). Why it is time to look beyond algal genes in photosynthetic slugs. *Genome Biol. Evol.* 7, 2602–7.
- [15] R. Goss, B. Lepetit B. Biodiversity of NPQ (2015). *J. Plant Phys.* 172, 13–32.
- [16] M. Handrich, J. de Vries, S.B. Gould, J. Serôdio, G. Christa (2017). Ulvophyceae photophysiology and research opportunities. *Persp. Phycol.* 4, 83–92.
- [17] V. Havurinne et al. (2021). Genetic autonomy and low singlet oxygen yield support kleptoplast functionality in photosynthetic sea slugs. *J. Exp. Bot.* 2021, erab216.
- [18] S. Mitoh, Y. Yusa (2021). Extreme autotomy and whole-body regeneration in photosynthetic sea slugs. *Curr. Biol.* 31, R233–R234.
- [19] G. Christa et al. (2014). Switching off photosynthesis: The dark side of sacoglossan slugs. *Commun. Integr. Biol.* 7, e28029.
- [20] C. Rauch et al. (2017). On being the right size as an animal with plastids. *Front. Plant. Sci.* 8, 1402.
- [21] S. Frankenbach et al. (2021). Kleptoplasts are continuously digested during feeding in the plastid-bearing sea slug *Elysia viridis*. *J. Moll. Studi.* 87, eyab022.
- [22] M. Trench et al. (1970). Utilization of photosynthetic products of symbiotic chloroplasts in mucus synthesis by *Placobranchus ianthobapsus* (Gould), Opisthobranchia, *Sacoglossa*. *Comp. Biochem. Phys.* 37, 113–117.
- [23] E. M. J. Laetz et al. (2017). Photosynthate accumulation in solar-powered sea slugs – starving slugs survive due to accumulated starch reserves. *Front. Zool.* 14, 4.
- [24] C. Rauch et al. (2018). The ability to incorporate functional plastids by the sea slug *Elysia viridis* is governed by its food source. *Mar. Biol.* 165, 82.
- [25] V. Schmitt et al. (2014). Chloroplast incorporation and long-term photosynthetic performance through the life cycle in laboratory cultures of *Elysia timida* (*Sacoglossa*, Heterobranchia). *Front. Zool.* 11, 5.

Verfasst von:



Katarina Kodžoman wurde 1999 in Essen geboren. Nach ihrem Abitur begann sie ihr Lehramtsstudium mit den Fächern Biologie und Erziehungswissenschaften an der Bergischen Universität in Wuppertal. Inzwischen ist sie als Vertretungslehrerin und als Dozentin an der Kinder- und Jugenduniversität in Wuppertal tätig und bietet dort praxisbezogene humanbiologische Kurse an. 2022 gewann sie einen Science-Slam-Wettbewerb, bei dem sie über die *Sacoglossa* einem Vortrag hielt. Aktuell fertigt sie am Institut für Zoologie und Didaktik der Biologie an der Bergischen Universität Wuppertal ihre Masterarbeit über *Elysia viridis* an.



Corinna Sickinger wurde 1994 in Bonn geboren. Ihr Bachelorstudium absolvierte sie an der Universität Bonn und sie befasste sich während ihrer Abschlussarbeit mit *Elysia viridis* in Zusammenarbeit mit der Universität Aveiro (Portugal). Während ihrer Masterarbeit im Bereich Organismic Biology, Evolutionary Biology, and Palaeobiology (OEP) an der Universität Bonn wurde sie von Prof. Dr. Heike Wägele (Zoologisches Forschungsmuseum Alexander Koenig) betreut und erstellte die erste Phylogenie der Cladobranchia (Nudibranchia, Gastropoda) basierend auf morphologischen Daten. 2021 begann sie ihre Dissertation am Institut für Zoologie und Didaktik der Biologie an der Bergischen Universität Wuppertal, die sich mit den Auswirkungen von Metallen auf die marine Nacktschnecke *Berghia stephanieae* befasst.



Jenny Melo Clavijo wurde 1989 in Bogotá (Kolumbien) geboren. Nach ihrem Bachelorstudium 2012 in Bogotá an der Pontificia Universidad Javeriana arbeitete sie bis 2015 als Biologin in Servicios Médicos Yunis Turbay. Anschließend studierte sie den Masterstudiengang Organismic Biology, Evolutionary Biology, and Palaeobiology (OEP) an der Universität Bonn und fertigte Ihre Masterarbeit am Zoologischen Forschungsmuseum Alexander Koenig 2018 bei Prof. Dr. Heike Wägele an. 2018 begann sie ihre Dissertation über die Rolle des Immunsystems in der Erkennung und Etablierung der Photosymbiose in marinen Heterobranchia am Institut für Zoologie und Didaktik der Biologie an der Bergischen Universität Wuppertal.



Gregor Christa wurde 1982 in Bamberg geboren. Nach seinem Diplom in Biologie an der Universität Bonn schloss er 2011 seine Dissertation am Zoologischen Forschungsmuseum Alexander Koenig in Bonn bei Prof. Dr. Heike Wägele ab. 2014–2016 war er Postdoktorand an der Universität Düsseldorf bei Prof. Dr. William Martin und von 2016–2018 Postdoktorand und Gruppenleiter an der Universität Aveiro in Portugal. Seit 2019 ist er Dozent am Institut für Zoologie und Didaktik der Biologie an der Bergischen Universität Wuppertal (BUW). An der BUW vertritt er aktuell die Professur für Evolution und Biodiversität der Tiere.

Korrespondenz

Dr. Gregor Christa
Gausstraße 20
42119 Wuppertal
E-Mail: christa@uni-wuppertal.de

WISSENSCHAFTSKOMMUNIKATION? – MACHEN!



Öffentlichkeitsarbeit für die Wissenschaft ist ungeheuer vielfältig. Da gibt es Vorträge, Workshops, Podcasts, Videos, Wettbewerbe, Laborkurse, Science-Slams und vieles mehr. Wie lernt man, mit der Öffentlichkeit (die ebenfalls sehr vielfältig ist) umzugehen, Wissenschaft zu erklären, und vielleicht sogar Begeisterung dafür zu erzeugen? Es gibt viele Trainingsangebote für freies Sprechen, didaktisch gute Leitung von Workshops, verständliches Schreiben und anderes. Das ist sicher nützlich und hilfreich. Es gibt aber auch die Möglichkeit, es einfach zu machen – nicht ahnungslos ins Blaue, sondern innerhalb

eines Teams, das sich über viele Jahre Erfahrungen erarbeitet hat. **Wir suchen Student/-innen, aber auch engagierte Schüler/-innen, die in die Wissenschaftskommunikation hineinschnuppern möchten – oder auch mit etwas Erfahrung eigene Ideen beisteuern und realisieren möchten.**

BioWissKomm ist in vielen Bereichen der Biowissenschaften unterwegs (www.biowisskomm.de), hier geht es aber in erster Linie darum, über das DFG Schwerpunktprogramm 2141 zu CRISPR-Cas zu informieren und zu berichten (siehe <https://crispr-whisper.de/>). Ein paar Grundkenntnisse zur „Genschere“ sind hilfreich, vor allem brauchen wir aber Engagement, den Willen, etwas zu lernen und Wissen weiterzugeben. Niemand kann die ganze Breite der Wissenschaftskommunikation abde-

cken, eine zuverlässige Mitarbeit bei einzelnen Teilprojekten würde uns schon helfen. Das kann z. B. das Design von Werbematerial sein, die Betreuung von Social Media, Organisation und/oder Durchführung von Workshops, Interviews führen und, und ... wir können einfach nicht alles aufzählen!

Bezahlen können wir Praktikant/-innen und freie Mitarbeiter/-innen auf Honorarbasis – damit wird man nicht unendlich reich, aber die Erfahrung ist unbezahlbar und die Mitarbeit in einem wissenschaftlichen Öffentlichkeitsprojekt macht sich nicht schlecht im Lebenslauf! Interessent/-innen können sich unter info@biowisskomm.de mit Lebenslauf und einem kurzen Motivations schreiben melden. Wir freuen uns dann auf ein persönliches Gespräch per Zoom!

Mit UDE BioSLIDES im Webbrowser die große Welt der kleinen Dinge erkunden

Virtuelle digitale Lichtmikroskopie in der Lehre

MICHAEL KLOSTER, BÁNK BESZTERI



Acer platanoides, Querschnitt durch einen Blattstiel, 40x vergrößert,
<http://udue.de/bioslides1>

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 170 erklärt.

Die Arbeit direkt am Mikroskop ist für Studierende der Lebenswissenschaften, ebenso wie für Schüler/-innen im Biologieunterricht, eine wertvolle und häufig auch sehr wertgeschätzte Erfahrung. Auch wenn entsprechendes Bildmaterial dank des Internets heutzutage leichter als jemals zuvor zugänglich ist, vermag dieses sicherlich nicht die gleiche Begeisterung für die Welt des Kleinen zu wecken wie das interaktive Erforschen eines ästhetisch ansprechenden mikroskopischen Präparates. Während der pandemiebedingten Einschränkungen des Labor- und Praktikumsbetriebs mussten wir jedoch nach neuen Wegen suchen, um diese Art der Interaktion auch im Distanzunterricht zu ermöglichen. Unsere Lösung kombiniert automatisierte digitale Mikroskopie, Bildverarbeitung und eigens entwickelte Software mit einer didakti-

Die lichtmikroskopische Untersuchung von Organismen und ihren Gewebetypen gehört zu den Basiselementen der schulischen und universitären Ausbildung in den Lebenswissenschaften. Mit UDE BioSLIDES (University of Duisburg-Essen – Biological Specimens Library: Downloadable Educational Scans) stellen wir ein System für die realitätsnahe Nachbildung solcher Untersuchungen in Form virtueller digitaler Mikroskopie vor. Dabei verfolgen wir ein Gesamtkonzept bestehend aus interaktiven digitalisierten Präparaten, didaktisch relevanten Zusatzinformationen und einer darauf abgestimmten, im Webbrowser laufenden Betrachtersoftware, die u. a. das ▶ Durchfokussieren durch mehrere Fokusebenen ermöglicht. Die Bilddaten und Zusatzinformationen stehen als ▶ Open Educational Resources zur Nutzung und Nachnutzung frei zur Verfügung.

schen Aufbereitung der Inhalte, welche wir nun der Öffentlichkeit zur Verfügung stellen möchten. Dieses ▶ „UDE BioSLIDES“ genannte Komplettpaket [1] unterscheidet sich in mehreren Punkten von anderen Mikroskopie-Bilddatenbanken [z. B. 2–4]:

- 1) Die Präparate wurden im Regelfall komplett, d. h. über ihre volle Ausdehnung in drei Dimensionen, in hoher Auflösung und Vergrößerung eingescannt.
- 2) Im Webbrowser-basierten Betrachter können die Präparate über eine Vielzahl von Fokusebenen durchfokussiert werden.
- 3) Die Präparate sind auf Lehrzwecke ausgerichtet, d. h. ergänzend zu den reinen Bilddaten sind viele weiterführende Informationen enthalten.

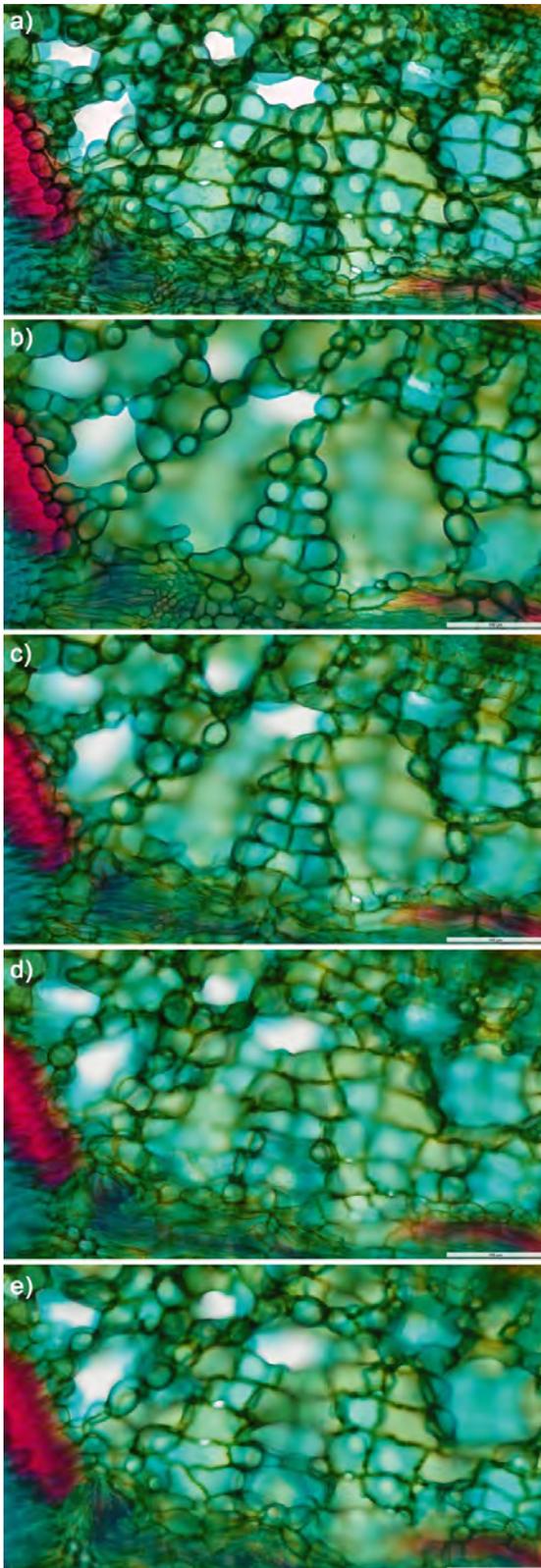


ABB. 1 Unterschiedliche Bildwirkung bei Aufnahmen des Schwammparenchyms eines Blattes von *Ilex aquifolium*. a) mittels Focus Stacking erzeugtes Extended-Focus-Bild, b–e) Auswahl einzelner Fokusebenen aus unterschiedlichen Schichten des Präparates. Nur letztere ermöglichen das Erarbeiten der dreidimensionalen Struktur des Gewebes.

- 4) Sämtliche Materialien (Bilder und Texte) stehen frei zur Nutzung und Nachnutzung zur Verfügung.
- 5) Die für den Betrachter notwendige Serverkomponente sowie relevante digitale Präparate können sehr einfach in einem lokalen Intranet oder sogar auf einem lokalen Rechner installiert werden, was den Einsatz auch in Situationen mit schlechter Internetanbindung ermöglicht.

In der medizinischen Ausbildung kommen sogenannte *virtual slides* oder *whole slide images* zwar bereits zum Einsatz [z. B. 5–7], hierbei handelt es sich jedoch häufig um kommerzielle oder eingeschränkte Angebote und in der Regel um Bilddaten, bei denen die Fokusebenen mittels *Focus Stacking* zu einem einzelnen sogenannten *Extended-Focus-Bild* zusammengefasst wurden. Hierdurch wird zwar die Schärfentiefe künstlich erhöht, die resultierende Bildwirkung unterscheidet sich jedoch sehr deutlich von dem, was direkt am Mikroskop zu sehen ist (Abbildung 1). UDE BioSLIDES hingegen erlaubt es, durch die verschiedenen Ebenen eines Untersuchungsobjektes hindurch zu fokussieren. Dieses ist besonders wichtig bei der Betrachtung botanischer Präparate, da diese meist deutlich dicker sind als histologische Dünnschnitte, und ermöglicht vor allem bei komplexeren Geweben die Erarbeitung dreidimensionaler Strukturen vergleichbar mit der Arbeit direkt am Mikroskop. Somit erlaubt UDE BioSLIDES trotz der rein digitalen Umsetzung eine realitätsnahe Mikroskopieerfahrung.

Die Präparate

Aktuell umfasst UDE BioSLIDES über 200 Präparate; hierbei handelt es sich größtenteils um Dünnschnitte von botanischem, aber auch zoologischem und mikrobiologischem Material von insgesamt ca. 75 verschiedenen Arten. Die verwendeten physischen Präparate wurden von Hobby-Mikroskopiker/-innen zur Verfügung gestellt oder selbst gefertigt und sind daher frei von kommerziellen Rechten. Für einige Organismen liegen Vergleichsreihen

IN KÜRZE

- Die **lichtmikroskopische Untersuchung** von Organismen und ihren Gewebetypen gehört zu den Basiselementen der schulischen und universitären Ausbildung in den Lebenswissenschaften.
- UDE BioSLIDES ermöglicht die realitätsnahe Nachbildung solcher Untersuchungen in Form **virtueller digitaler Mikroskopie im Webbrowser**.
- Hierbei ermöglicht das Durchfokussieren durch das Untersuchungsobjekt das **Erarbeiten dreidimensionaler anatomischer Strukturen**.
- Dafür stehen mehr als **200 digitale Präparate** zur Verfügung, welche mit didaktisch relevanten Zusatzinformationen erweitert wurden.
- Das System und die Daten stehen als **Open Educational Resource** zur Nutzung und Nachnutzung frei zur Verfügung.

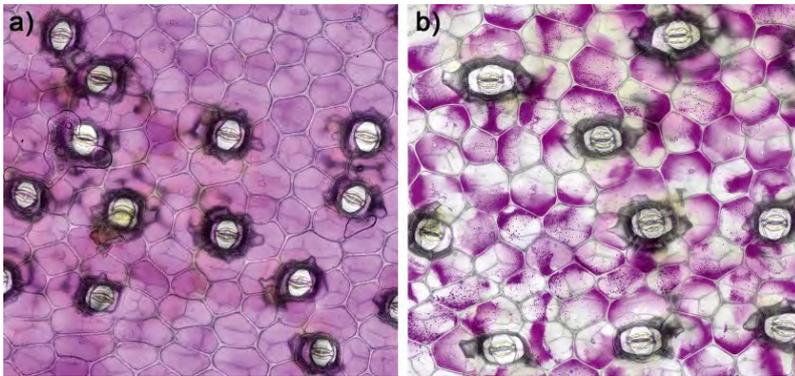


ABB. 2 Plasmolyse der unteren Epidermis der Dreimasterblume (*Tradescantia spathacea*), a) vor und b) nach der Plasmolyse, Ausschnitte aus <http://udue.de/bioslides177> und <http://udue.de/bioslides175>

vor, welche z. B. die Wirkung unterschiedlicher Färbemethoden bzw. Mikroskopieverfahren oder eine fortschreitende Plasmolyse zeigen (Abbildung 2). Über eine interaktive Webseite kann die Sammlung nach verschiedenen Kriterien wie Organismtyp, Spezies, gemeinem Namen, Schnitt, Färbung u. v. m. sortiert und durchsucht werden. Kleine Vorschaubilder und eine integrierte Bildgalerie geben dabei einen Vorgeschmack auf das eigentliche Präparat (Abbildung 3).

Jedes physische Präparat (das Untersuchungsobjekt auf einem Objektträger) wurde mit einer geeigneten Vergrößerung über 40–80 Fokusebenen vollflächig eingescannt, wobei jede einzelne Ebene bis zu mehrere tausend Megapixel groß sein kann. Neben den Bilddaten enthält das digitale Präparat (Abbildung 4) auch Informationen über den Organismus (taxonomische Bezeichnung, gemei-

ner Name, Links zu weiterführenden Quellen und vergleichbaren Präparaten), die Präparation (Schnitt, Fixierung, Färbung, Eindeckung) und die Mikroskop-Optik (Vergrößerung und numerische Apertur des Objektivs, Immersion, Apertur, Abbildungs- und Beleuchtungsverfahren). In den meisten Präparaten sind einzelne Bereiche, z. B. unterschiedliche Gewebetypen, in Form sogenannter Annotationen markiert und beschrieben. Sämtliche textbasierten Informationen liegen zweisprachig auf Deutsch und auf Englisch vor. Die Bilddaten sind jeweils in drei verschiedenen Formaten verfügbar:

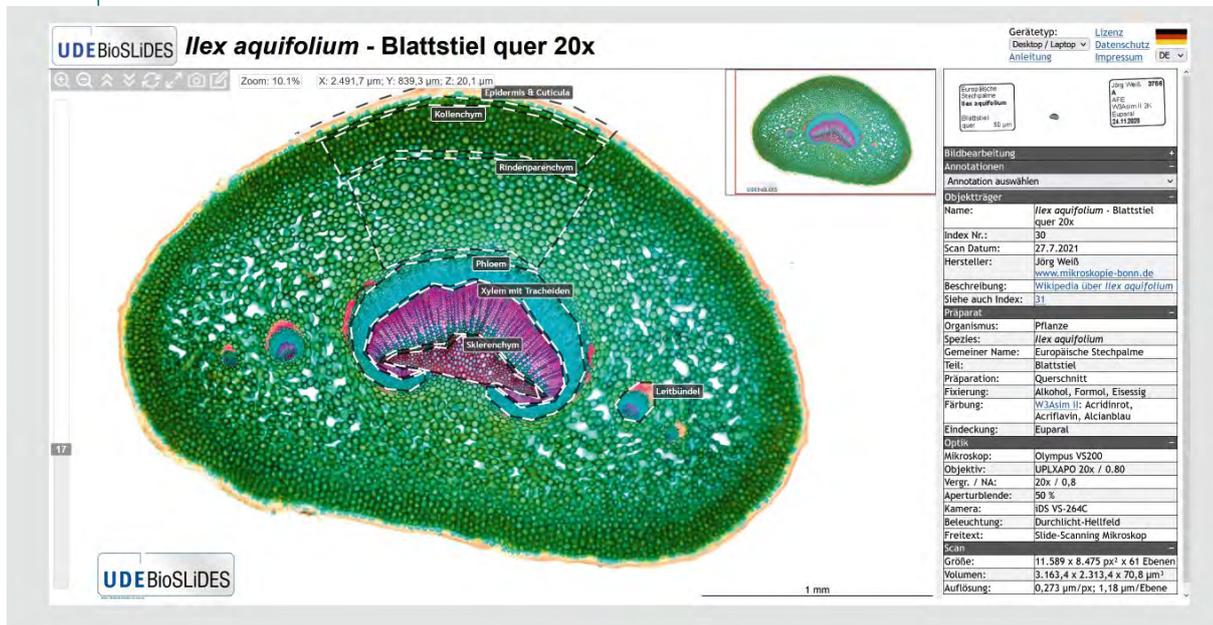
- 1) Im *Deep-Zoom*-Format [8], welches intern vom UDE BioSLIDES-Viewer (s. u.) verwendet wird.
- 2) Für jede einzelne Fokusebene abhängig von der Bildgröße als JPG- bzw. BigTIFF-Bilddatei.
- 3) Als *Extended-Focus-Bild*, bei welchem alle Fokusebenen zu einer einzelnen Bildebene zusammengefasst wurden, ebenfalls als JPG- bzw. BigTIFF-Datei.

Diese Formate können zur Nachnutzung z. B. für die Erstellung von Unterrichtsmaterialien heruntergeladen werden. Eines der aktuell umfangreichsten digitalen Präparate bildet einen Längsschnitt durch die Vordergliedmaße einer Maus (*Mus musculus*) ab, aufgenommen mit einem 60×/1,42-Objektiv über 61 Fokusebenen, jede davon ist ca. 76.000 × 44.000 Pixel bzw. 7 × 4 mm² groß (Abbildung 5). Die Kantenlänge eines Pixels entspricht dabei 0,091 µm, der Abstand zwischen den Fokusebenen 0,28 µm. Insgesamt umfasst das digitale Präparat über 200 Milliarden Pixel, die entsprechenden Bilddateien benötigen zusammen über 30 GB Speicherplatz. Die bisher erstellten über 200 Präparate umfassen insgesamt ca. 4.700 Gigapixel, der Speicherbedarf hierfür beträgt ca. 1,5 Terabyte.

ABB. 3 | DIE DIGITALE PRÄPARATE-SAMMLUNG

ID	Name	Bild	Organismus	Spezies	Gemeiner Name	Teil	Präparation	Beschreibung	Stichworte	Fixierung	Färbung	Eindeckung	Hersteller	Scan Datum	Mikroskop	Objektiv
1	Acer platanoides - Blattstiel quer 40x		Pflanze	<i>Acer platanoides</i>	Spitzahorn	Blattstiel	Querschnitt	Wikipedia über Acer platanoides		Alkohol, Formol, Eisessig	W3Asim I: Acridinrot, Acriflavin, Astrablau	Euparal	Jörg Weiß www.mikroskopie-bonn.de	2021-07-27 13:22:49	Olympus VS200	UPLXAPO O 40x / 1.40
2	Acer platanoides - Zweig quer 20x		Pflanze	<i>Acer platanoides</i>	Spitzahorn	Zweig	Querschnitt	Wikipedia über Acer platanoides		Alkohol, Formol, Eisessig	Etzold blau: Fuchsin, Chrysoidin, Astrablau	Euparal	Rainer Teubner	2021-07-01 14:51:37	Olympus VS200	UPLXAPO 20x / 0.80
4	Acer pseudoplatanus - Blatt quer 20x		Pflanze	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Berg-Ahorn	Blatt	Querschnitt	Wikipedia über Acer pseudoplatanus		Alkohol, Formol, Eisessig	W-Asim III simultan: Rhodamin B, Acriflavin, Astrablau	Euparal	Jörg Weiß www.mikroskopie-bonn.de	2021-08-17 11:39:37	Olympus VS200	UPLXAPO 20x / 0.80
3	Acer pseudoplatanus - Fluegelhuss quer 20x		Pflanze	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Berg-Ahorn	Frucht	Querschnitt	Wikipedia über Acer pseudoplatanus		Alkohol, Formol, Eisessig	W-Asim III simultan: Rhodamin B, Acriflavin, Astrablau	Euparal	Jörg Weiß www.mikroskopie-bonn.de	2021-07-27 14:29:53	Olympus VS200	UPLXAPO 20x / 0.80
5	Akebia quinata - Junger Spross quer 20x		Pflanze	<i>Akebia quinata</i>	Fingerblättrige Akebie	Spross	Querschnitt	Wikipedia über Akebia quinata		Alkohol, Formol, Eisessig	W-Asim III sukzedant: Rhodamin B, Acriflavin, Astrablau	Euparal	Jörg Weiß www.mikroskopie-bonn.de	2021-07-27 15:15:46	Olympus VS200	UPLXAPO 20x / 0.80
101	Araucaria heterophylla - Trieb quer 20x.1		Pflanze	<i>Araucaria heterophylla</i>	Zimmertanne	Trieb	Querschnitt	Wikipedia über Araucaria heterophylla		Alkohol, Formol, Eisessig	Etzold blau: Fuchsin, Chrysoidin, Astrablau	Euparal	Rainer Teubner	2021-10-28 16:22:12	Olympus VS200	UPLXAPO 20x / 0.80
102	Araucaria heterophylla - Trieb quer 20x.2		Pflanze	<i>Araucaria heterophylla</i>	Zimmertanne	Trieb	Querschnitt	Wikipedia über Araucaria heterophylla		Alkohol, Formol, Eisessig	Etzold blau: Fuchsin, Chrysoidin, Astrablau	Euparal	Rainer Teubner	2021-10-28 16:36:32	Olympus VS200	UPLXAPO 20x / 0.80
103	Araucaria heterophylla - Trieb quer 20x.3		Pflanze	<i>Araucaria heterophylla</i>	Zimmertanne	Trieb	Querschnitt	Wikipedia über Araucaria heterophylla		Alkohol, Formol, Eisessig	Etzold blau: Fuchsin, Chrysoidin, Astrablau	Euparal	Rainer Teubner	2021-10-28 16:49:42	Olympus VS200	UPLXAPO 20x / 0.80
104	Araucaria heterophylla - Trieb quer 20x.4		Pflanze	<i>Araucaria heterophylla</i>	Zimmertanne	Trieb	Querschnitt	Wikipedia über Araucaria heterophylla		Alkohol, Formol, Eisessig	Etzold blau: Fuchsin, Chrysoidin, Astrablau	Euparal	Rainer Teubner	2021-10-28 17:04:01	Olympus VS200	UPLXAPO 20x / 0.80
19	Aristolochia macrophylla - Spross quer 20x		Pflanze	<i>Aristolochia macrophylla</i>	Amerikanische Pfeifenwinde	Spross	Querschnitt	Wikipedia über Aristolochia macrophylla		Alkohol, Formol, Eisessig	Etzold blau: Fuchsin, Chrysoidin, Astrablau	Euparal	Rainer Teubner	2021-08-17 09:40:15	Olympus VS200	UPLXAPO 20x / 0.80

ABB. 4 | DER UDE BIOSLIDES-PRÄPARATE-VIEWER



Der Betrachter

Mithilfe des eigens entwickelten UDE BioSLIDES-Viewers können die digitalen Präparate im Webbrowser auf Endgeräten wie Desktop-Computern, Laptops, Tablets und (in eingeschränktem Maße) Smartphones unter verschiedenen Betriebssystemen betrachtet werden. Der Viewer ermöglicht das Zoomen, Verschieben, Drehen und Durchfokussieren des Untersuchungsobjektes und zeigt weiterführende Informationen sowie Annotationen an (Abbildung 4 und 6). Die Steuerung erfolgt über individuelle Bedienelemente sowie Mausfunktionen bzw. Tastaturkürzel, dabei werden Zoom-Stufe, Maßstabsbalken sowie die aktuelle Fokusebene und die Position des Maus-Cursors innerhalb des Präparates angezeigt. Zu Dokumentationszwecken können Screenshots des angezeigten Bildausschnitts sowie Links, die zur aktuellen Ansicht führen, angefertigt werden. Einfache Bildverarbeitungsfunktionen ermöglichen die Anpassung des Bildkontrastes, was besonders bei ungefärbten Präparaten hilfreich ist, sowie die nachträgliche Änderung der Farbgebung, was insbesondere Personen mit eingeschränkter Farbwahrnehmung zugutekommen kann. Die technischen Informationen zu

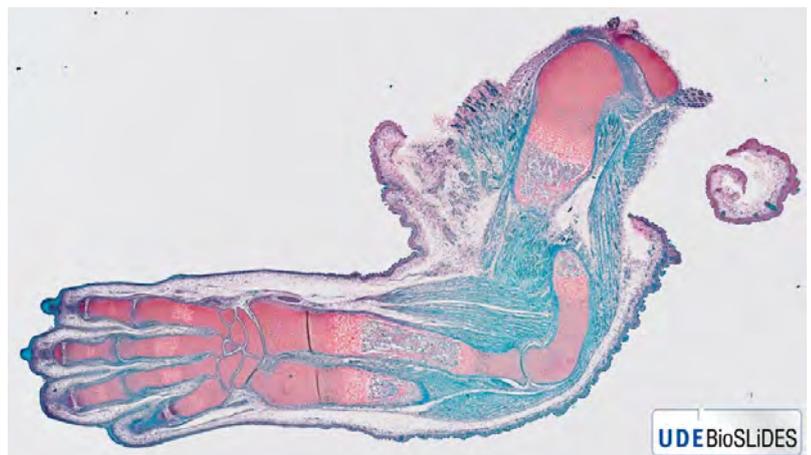


ABB. 5 Vordergliedmaße der Maus (*Mus musculus*), 60x, <http://udue.de/bioslides37>

Präparat, Präparation und Mikroskopie werden ergänzt durch Links z. B. zu relevanten Wikipedia-Einträgen, ähnlichen UDE BioSLIDES-Präparaten sowie durch den Download des digitalen Präparates in verschiedenen Formaten. Zu annotierten Bereichen, welche üblicherweise unterschiedliche Gewebetypen oder Strukturen wie z. B. Leit

ABB. 6 | BEDIENELEMENTE DES PRÄPARATE-VIEWERS

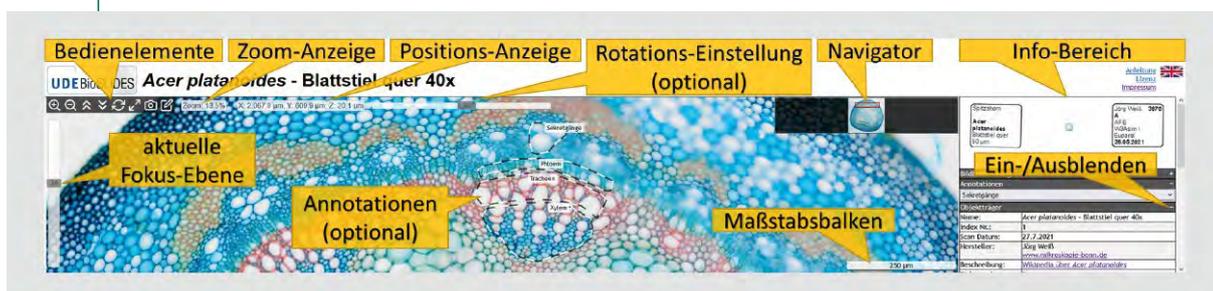
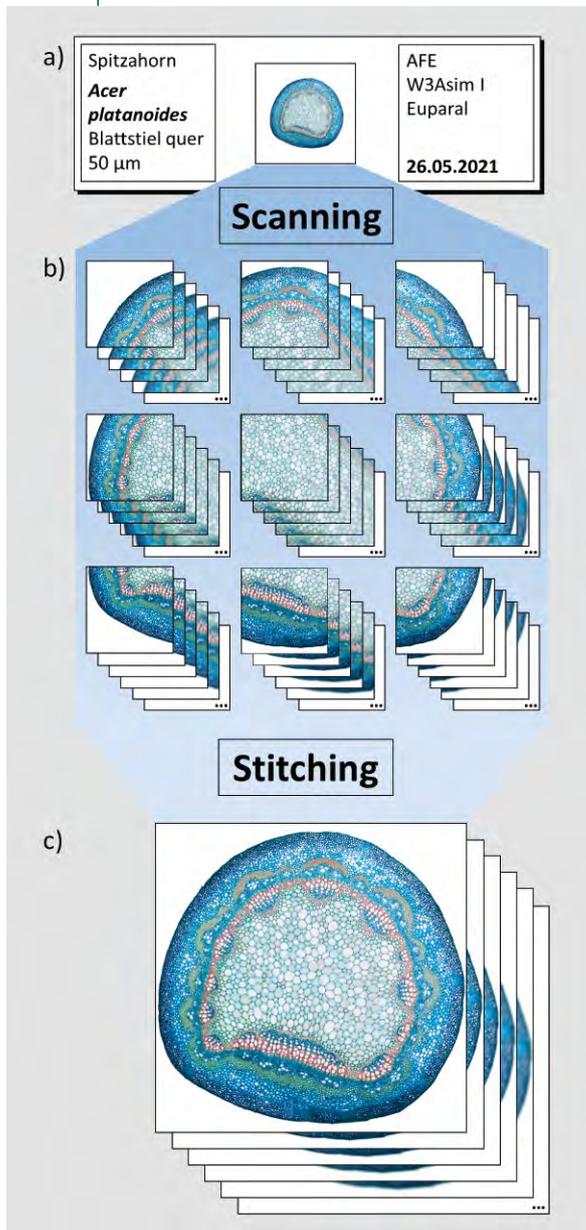


ABB. 7 | DIGITALISIERUNG DER PRÄPARATE



a) Objektträger mit Präparat, b) Scannen des Präparates in Form von überlappenden Bildfeldern über viele Fokusebenen, c) Zusammensetzen der Einzelbilder jeder Fokusebene zu jeweils einem großen Gesamtbild mittels **Stitching**.

bündel oder Spaltöffnungen verdeutlichen, werden kurze Beschreibungstexte eingeblendet, und die entsprechenden Ausschnitte des digitalen Präparates können direkt angesprungen werden.

Die Technik

Aufnahme: Die Präparate wurden mithilfe eines Olympus VS200 ► Slidescanners mit verschiedenen hochauflösenden Objektiven (20×/0,80, 40×/1,40 oder 60×/1,42) ein-

gescannt. Das Gerät fährt dabei die komplette Fläche des Präparates in Form sich leicht überlappender Bildfelder ab, wobei an jeder Position ca. 40–80 unterschiedliche Fokuspositionen erfasst werden (Abbildungen 7a und b). Der Abstand der Fokusebenen entspricht dabei meist der halben, gelegentlich der vollen Schärfentiefe des Objektivs, d. h. jedes Detail des Untersuchungsobjektes ist in mindestens einer Fokusebene scharf abgebildet. Für jede einzelne Fokusebene werden die bis zu mehrere tausend einzelnen Bildfelder über einen ► *Stitching* genannten Prozess zu einem einzelnen großen Gesamtbild zusammengesetzt (Abbildung 7c). Dieses umfasst je nach Präparat bis zu mehrere tausend Megapixel.

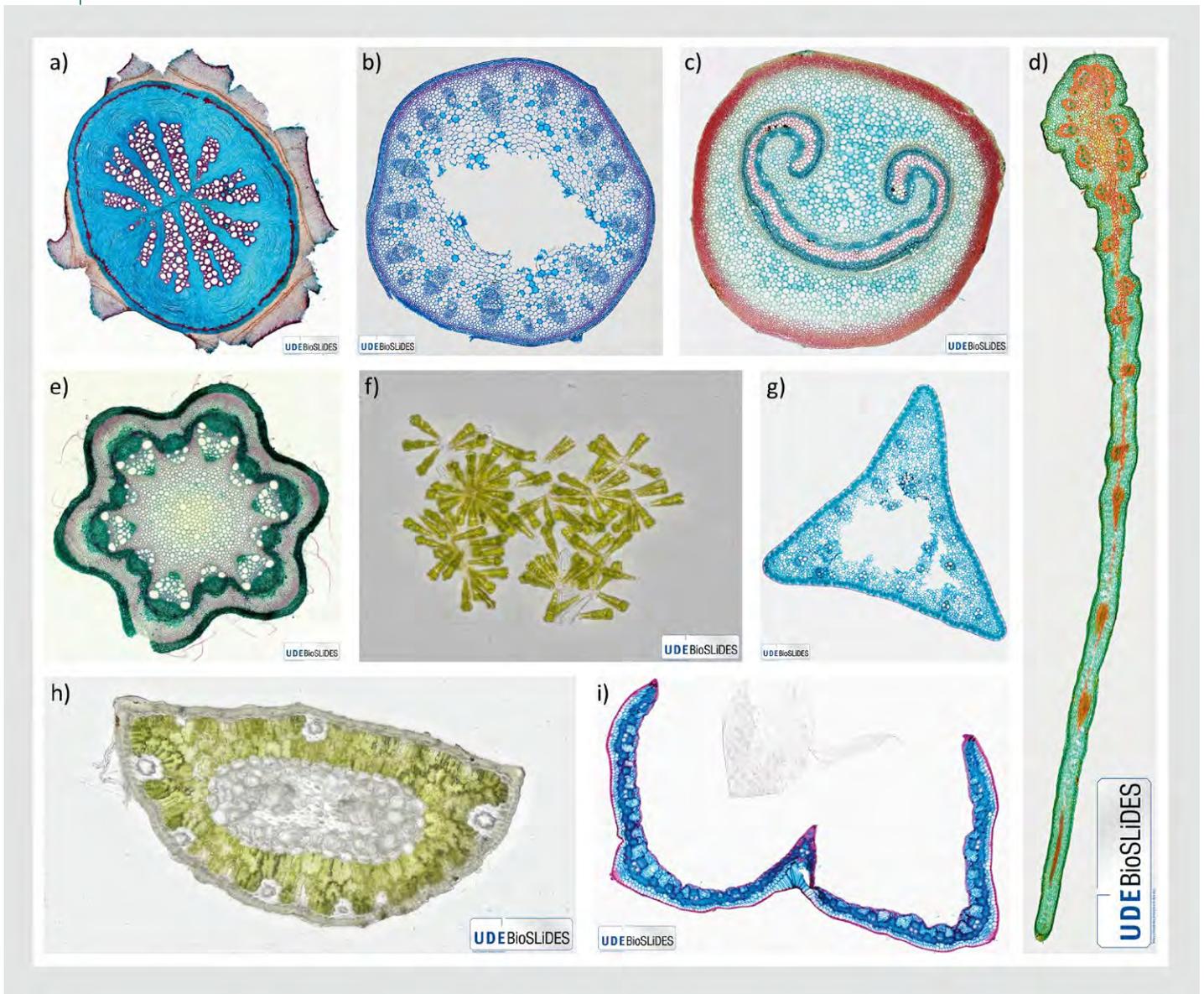
Post-Processing: Das proprietäre Dateiformat des Slidescanners muss für die Verwendung in UDE BioSLIDES in geeignete Datenformate übersetzt und weiterverarbeitet werden. Ein besonderer Knackpunkt hierbei ist die Größe der einzelnen Fokusebenen, da diese größer sein können als es Standard-Bilddateiformate wie JPEG oder TIFF erlauben. Um die Nachnutzung der Bilddaten zu erleichtern, werden die verschiedenen Ebenen mittels *Focus Stacking* zu einem *Extended-Focus-Bild* vereint, welches das Untersuchungsobjekt in einer einzigen Bildebene scharf darstellt. Weiterführende Informationen zum Präparat, der Präparation, der Mikroskop-Optik sowie Annotationen müssen zum Teil händisch erfasst und integriert werden. Für die einzelnen Verarbeitungsschritte kommen eine Reihe von *Open-Source*-, kommerziellen und selbst entwickelten *Software-Tools* sowie offene Dateiformate wie JPG, (Big)TIFF und JSON zum Einsatz.

Visualisierung: Der UDE BioSLIDES-Viewer wurde in JavaScript/HTML entwickelt und basiert auf einer Reihe von *Open-Source-Tools* und *Frameworks*; als Basis für die Visualisierung dient *OpenSeadragon* [9], welches eigens um die Funktionen für das Durchfokussieren erweitert wurde. Darüber hinaus integriert der Viewer die Anzeige von textbasierten Informationen und Annotationen und ermöglicht so eine vielfältige Interaktion mit dem digitalen Präparat.

Die Nutzungsmöglichkeiten

Abbildungen 8 und 9 zeigen einige Beispiele digitaler Präparate aus UDE BioSLIDES, die unter <https://bioslides.biologie.uni-due.de> zu finden sind. Die Bildwirkung der digitalen Präparate ist u. a. dank der Funktion zum Durchfokussieren sehr nah an derjenigen, welche bei der Arbeit direkt am Mikroskop erlebt wird. Dies erlaubt es, mikroskopische Untersuchungen realitätsnah durchzuführen, auch ohne Zugang zu entsprechenden Geräten und Materialien zu haben. Als digitale Präparatesammlung, Plattform für virtuelle Mikroskopie und Quelle für *Open Educational Resources* eröffnet UDE BioSLIDES eine Reihe unterschiedlicher Nutzungsmöglichkeiten z. B. bei der Durchführung virtueller Mikroskopieübungen in der schulischen oder universitären Ausbildung. Hierfür stehen alle Bild- und Textmaterialien als *Open Educational*

ABB. 8 | BEISPIELE DIGITALER PRÄPARATE



- a) *Aristolochia macrophylla* – Spross-Querschnitt 20x, <http://udue.de/bioslides18>
 b) *Papaver rhoeas* – Stängel-Querschnitt 20x, <http://udue.de/bioslides178>
 c) *Osmunda regalis* – Wedelstiel-Querschnitt 20x, <http://udue.de/bioslides28>
 d) *Acer pseudoplatanus* – Flügelnuss-Querschnitt 20x, <http://udue.de/bioslides3>
 e) *Clematis vitalba* – Stängel-Querschnitt 20x, <http://udue.de/bioslides109>
 f) *Gomphonema acuminatum* (Kieselalge) – Lebendpräparat vitaler Zellen 60x, <http://udue.de/bioslides204>
 g) *Cyperus longus* – Stängel-Querschnitt 20x, <http://udue.de/bioslides114>
 h) *Pinus* sp. – Nadel-Querschnitt 20x, <http://udue.de/bioslides218>
 i) *Cyperus longus* – Blatt-Querschnitt 20x, <http://udue.de/bioslides112>

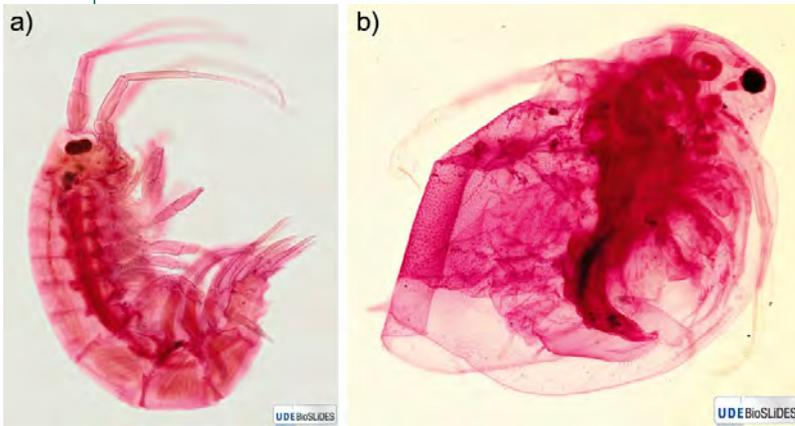
Resources [10] unter der freien CC BY-SA 4.0-Lizenz [11] zur Verfügung, um die Nachnutzung z. B. als Unterrichtsmaterial auch jenseits der interaktiven digitalen Präparate zu ermöglichen:

1) Mit Hilfe von Links, welche z. B. in einem digitalen Lehrsystem wie Moodle [12] hinterlegt werden, können definierte Ausschnitte spezifischer Präparate ange-

zeigt werden, um bestimmte anatomische Strukturen zu illustrieren. Anders als bei der Verwendung eines herkömmlichen Bildausschnitts ist es hier dem Betrachter möglich, frei und in drei Dimensionen den anatomischen Kontext der Zielstruktur zu erkunden.

2) Die digitalen Präparate können als Vorlage für die Anfertigung anatomischer Zeichnungen dienen; hier-

ABB. 9 | BEISPIELE TIERISCHER PRÄPARATE



a) Flohkrebs (Gattung *Gammarus*) – Totalpräparat 20x, <http://uue.de/bioslides29>

b) *Daphnia pulex* – Totalpräparat 20x, <http://uue.de/bioslides221>

bei wird durch das Durchfokussieren das Erarbeiten dreidimensionaler Strukturen und somit ein tieferes Verständnis des Untersuchungsobjektes ermöglicht. Da die Präparate in der Regel vollflächig eingescannt wurden, können in den meisten Fällen einzelnen Schüler/-innen bzw. Studierenden unterschiedliche Bildbereiche zum Betrachten und Bearbeiten zugewiesen werden.

GLOSSAR

Durchfokussieren: Verstellen der Fokusebene am Mikroskop bzw. im UDE BioSLIDES-Viewer. Dies ist notwendig, da die Schärfentiefe des Objektivs üblicherweise deutlich geringer ist als die Dicke des mikroskopischen Präparates. Nur durch das Durchfokussieren werden Details aus allen Schichten des Untersuchungsobjektes sichtbar und kann ein tieferes Verständnis dreidimensionaler anatomischer Strukturen erarbeitet werden.

Extended-Focus-Bild: Ein Bild mit künstlich erhöhter Schärfentiefe, welches mittels Focus Stacking aus mehreren Fokusebenen zusammengesetzt wurde. Hierdurch sind Details aus unterschiedlichen Fokusebenen gleichzeitig sichtbar, jedoch gehen Informationen über die dreidimensionale Struktur des Untersuchungsobjektes verloren.

Focus Stacking: Das Verfahren, mit dessen Hilfe die in unterschiedlichen Fokusebenen scharf abgebildeten Strukturen zu einem einzelnen Extended-Focus-Bild mit erhöhter Schärfentiefe zusammengesetzt werden.

Open Educational Resources (OER): Bildungsmaterialien, welche unter einer offenen Lizenz zur kostenlosen und freien Nutzung, Bearbeitung und Weiterverbreitung angeboten werden.

Slidescanner: Ein automatisiertes Mikroskop, mit dessen Hilfe große Bereiche eines Untersuchungsobjektes in Form überlappender Einzelbilder und über viele Fokusebenen automatisch aufgenommen werden können.

Stitching: Zusammensetzen überlappender Einzelbilder zu einem großen Gesamtbild, ähnlich der Panorama-Funktion moderner Smartphones und Kameras.

UDE BioSLIDES: University of Duisburg-Essen – Biological Specimens Library: Downloadable Educational Scans, ein auf Ausbildungszwecke ausgerichtetes System für virtuelle digitale Lichtmikroskopie mit über 200 digitalen Präparaten.

- 3) Da Benutzeroberfläche und Beschreibungstexte sowohl auf Deutsch als auch auf Englisch zur Verfügung stehen, ist auch eine Nutzung im bilingualen Unterricht vorstellbar.
- 4) Alle digitalen Präparate stehen nicht nur zur interaktiven Nutzung innerhalb des Viewers, sondern auch als vollflächiges Bild sowohl für jede einzelne Fokusebene wie auch als mittels *Focus Stacking* generiertem *Extended-Focus-Bild* frei zur Verfügung. Auf dieser Basis können angepasste Bildausschnitte generiert und z. B. für Unterrichtsmaterialien außerhalb des UDE BioSLIDES-Viewers nachgenutzt werden.
- 5) Falls keine ausreichend starke Internetanbindung zur Verfügung steht, können digitale Präparate mit wenig Aufwand auch in einem lokalen Netzwerk oder Intranet z. B. für die Verwendung im Klassenverband zur Verfügung gestellt werden. Hierfür wird nur ein einfacher Webserver für statische Inhalte benötigt, eine entsprechende Anleitung wird bald auf der UDE BioSLIDES-Webseite hinterlegt.

Ausblick

UDE BioSLIDES soll sowohl technisch als auch inhaltlich laufend weiterentwickelt werden. Aktuell in Arbeit ist eine Version, welche auf einem eigenen Server in einem lokalen Intranet betrieben werden kann, um die Verwendung durch größere Nutzergruppen auch in Situationen mit schlechter oder sogar ohne Internetanbindung zu ermöglichen. Darüber hinaus ist z. B. geplant, eigene Annotationen anlegen und auf den offiziellen Server hochladen zu können. Die digitale Präparatesammlung soll weiter ergänzt werden um Präparate, wie sie üblicherweise in biologischen Grundpraktika zum Einsatz kommen, sowie um Material aus der *Central Collection of Algal Cultures (CCAC)* der Universität Duisburg-Essen.

Zusammenfassung

UDE BioSLIDES ist ein auf Ausbildungszwecke ausgerichtetes System für virtuelle digitale Mikroskopie, welches die realitätsnahe Nachbildung lichtmikroskopischer Untersuchungen verschiedener Organismen ermöglicht. Hierfür steht eine Sammlung von über 200 digitalen Präparaten zur Verfügung. Diese Präparate beinhalten hochaufgelöste Scans kompletter Untersuchungsobjekte über eine Vielzahl von Fokusebenen sowie weiterführende Informationen zu Organismus, verschiedenen anatomischen Strukturen, Präparation und verwendeter Mikroskopietechnik. Der im Webbrowser laufende Viewer dient der interaktiven Betrachtung, wobei besonders das Durchfokussieren ein Erarbeiten dreidimensionaler Strukturen und somit ein tieferes Verständnis des Untersuchungsobjektes ermöglicht. Die Inhalte von UDE BioSLIDES stehen als Open Educational Resources in verschiedenen Formaten für eine vielfältige Nutzung und Nachnutzung frei zur Verfügung.

Summary

Discovering the big world of small things in the web browser with UDE BioSLIDES

UDE BioSLIDES constitutes a system for virtual digital microscopy specifically designed for educational purposes. It enables realistic emulations of light microscopy-based investigations of different organisms; currently it provides more than 200 digital slides. These represent high-resolution scans of entire objects of examination over various focal planes, supplemented by additional information about the organism, different anatomical structures, preparation, and used microscopy technique. The web browser-based viewer allows for interactively examining the specimen, whereby especially focal plane changes provide the possibility of working out three-dimensional structures – thus enabling a deeper insight into the object of investigation. The contents of UDE BioSLIDES are freely available as Open Educational Resources in different formats for versatile use and repurposing.

Danksagung

Unser Dank gilt der Fakultät Biologie der Universität Duisburg-Essen (UDE), welche das Einscannen der Präparate mittels einer Anschubfinanzierung ermöglicht hat; den Entwicklern der Software-Pakete, welche die Basis für die UDE BioSLIDES-Software bilden, im Besonderen *OpenSeadragon* [9] und *Annotorious* [13]; dem OER-Team der Universität Duisburg-Essen für ihre Unterstützung bezüglich *Open Educational Resources* und für die Finanzierung des Annotierens; Isabell Lazar und Eileen Winkendick für das Annotieren der Präparate; Ken Dreger für seine Unterstützung beim Aufsetzen des Servers, sowie dem Team des Zentrums für Informations- und Mediendienste der UDE (ZIM), allen voran Sascha Sczyrba; den Mitgliedern des Mikroskopie-Forums (<https://www.mikroskopie-forum.de/>) für ihre Anregungen; sowie allen Personen, die Präparate zur Verfügung gestellt haben, in ganz besonderem Maße Rainer Teubner und Jörg Weiß (<http://www.mikroskopie-bonn.de/>).

Schlagworte

Virtuelle Mikroskopie, digitale Präparate, schulische und universitäre Ausbildung, *Open Educational Resources*, Mikroskopiepraktikum, Distanzunterricht

Literatur

- [1] M. Kloster. UDE BioSLIDES. <http://udue.de/bioslides>
- [2] Various contributors. Cytomine Open Access Image Collection, <https://cytomine.com/collection>
- [3] Various contributors. IDR: Image Data Resource, <https://idr.openmicroscopy.org/>
- [4] Bio-Atlas, <https://bio-atlas.psu.edu/>
- [5] N. Sharmin et al. (2021), Histoscope: A Web-Based Microscopy Tool for Oral Histology Education. *Healthcare Informatics Research* 27, 146-152.
- [6] A. G. Loeffler et al. (2019). A Taxonomic Index for Retrieval of Digitized Whole Slide Images from an Electronic Database for Medical School and Pathology Residency Education. *Journal of Pathology Informatics* 10, 33.
- [7] N. R. Kumar et al. (2020). Whole Slide Imaging (WSI) in Pathology: Current Perspectives and Future Directions. *Journal of Digital Imaging* 33, 1034-1040.
- [8] Microsoft. Deep Zoom File Format Overview, [https://learn.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/silverlight/dotnet-windows-silverlight/cc645077\(v=vs.95\)](https://learn.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/silverlight/dotnet-windows-silverlight/cc645077(v=vs.95))
- [9] OpenSeadragon contributors. OpenSeadragon 3.1.0, <https://openseadragon.github.io/>
- [10] OERinfo (2022). Informationsstelle Open Educational Resources, <https://open-educational-resources.de/>
- [11] Creative Commons. Creative Commons - CC BY-SA 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>
- [12] Moodle – Open-source learning platform, <https://moodle.org>
- [13] R. Simon. Annotorious 2.7.8 OpenSeadragon Plugin, <https://annotorious.github.io/>

Verfasst von:



Bild: Fenina Buttler

Michael Kloster ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Phykologie der Universität Duisburg-Essen. Er studierte Biotechnologie/ Bioinformatik an der Hochschule Emden/Leer und promovierte 2018 an der Universität Bremen (Dissertation über Hochdurchsatz-Morphometrie von Kieselalgen des Süd-Ozeans). In einer Doppelfunktion als Software-Entwickler und Biologe beschäftigt er sich seit mittlerweile zehn Jahren mit der Entwicklung automatisierter Bildgebung und bildbasierter Analysemethoden für Kieselalgen. Aktuell liegt sein Arbeitsschwerpunkt in der Entwicklung von Deep Learning-basierten Systemen für die Segmentierung und Klassifikation lichtmikroskopischer Aufnahmen.



Bild: UDE

Bábk Beszteri ist Leiter der Arbeitsgruppe Phykologie der Universität Duisburg-Essen. Er studierte Biologie an der Eötvös Loránd Universität in Budapest und promovierte 2005 an der Universität Bremen über molekulare Diversität von Diatomeen (Kieselalgen). Nach Postdoc-Phasen im Bereich der Phylogenomik und Umweltgenomik hat er von 2010–2019 das Hustedt-Zentrum für Diatomeenforschung inkl. der gleichnamigen Sammlung am Alfred-Wegener-Institut für Polar und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven geleitet, wo sein Interesse an digitalen Mikroskopiemethoden für die Mobilisierung der Sammlung geweckt wurde. Neben der Weiterentwicklung solcher Analysemethoden und deren Einsatz für diverse wissenschaftliche Fragestellungen liegen seine aktuellen Forschungsinteressen im Bereich der Ökologie und Evolution von Kieselalgen.

Korrespondenz

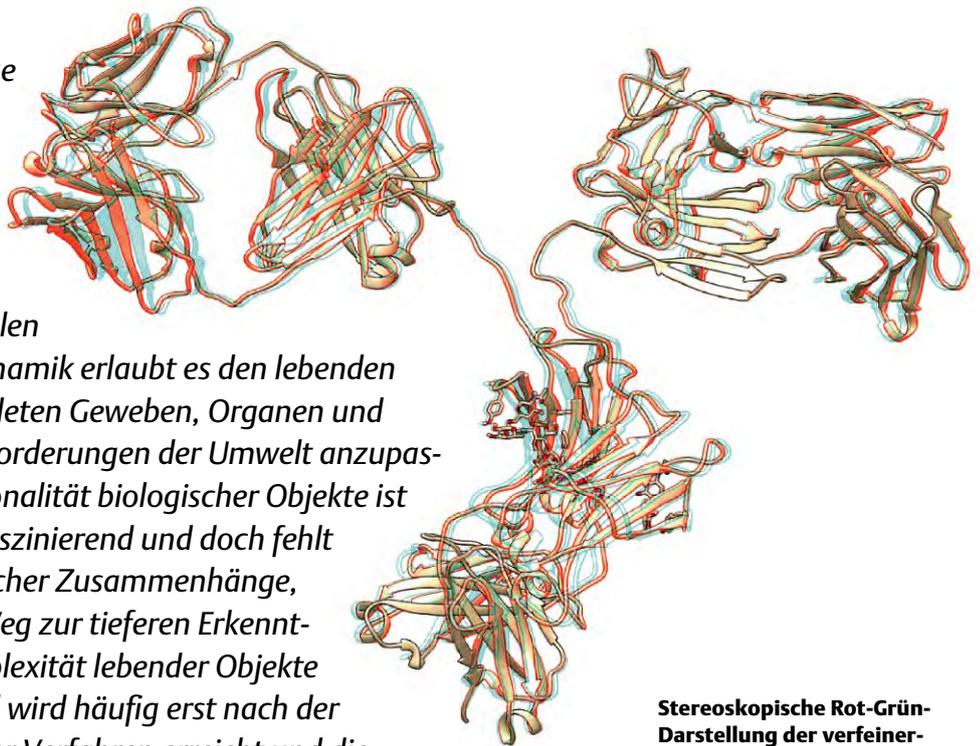
Dr. Michael Kloster
Fakultät für Biologie, AG Phykologie
Universität Duisburg-Essen
Universitätsstr. 2
45141 Essen
E-Mail: michael.kloster@uni-due.de

3D-Druck in der Biologie

Vom biologischen Vorbild zum 3D-Universum

HARTMUT BÖHM

Alle in der Biologie betrachteten Dinge existieren in einer dreidimensionalen Welt. Selbstverständlich ändert sich die räumliche Struktur einer Zelle mit ihrem Inventar an Makromolekülen, Kompartimenten und den bei Eukaryoten vorhandenen Zellorganellen über die Lebenszeit. Gerade diese Dynamik erlaubt es den lebenden Zellen, wie auch den aus ihnen gebildeten Geweben, Organen und Organismen, sich an wechselnde Anforderungen der Umwelt anzupassen. Die Ausbildung der Dreidimensionalität biologischer Objekte ist phylogenetisch und ontogenetisch faszinierend und doch fehlt sie häufig in der Darstellung biologischer Zusammenhänge, beispielsweise in Lehrbüchern. Der Weg zur tieferen Erkenntnis über die mehrdimensionale Komplexität lebender Objekte ist aber zuweilen langwierig. Das Ziel wird häufig erst nach der Entwicklung komplizierter technischer Verfahren erreicht und die dabei eingesetzten Untersuchungsmethoden und Analysen gestalten sich komplex. Eine einfache Möglichkeit, die Dreidimensionalität biologischer Dinge im wahrsten Sinne zu begreifen, liefert der 3D-Druck.



Stereoskopische Rot-Grün-Darstellung der verfeinerten Struktur eines intakten monoklonalen IgG2a-Antikörpers. Quelle: PDB DOI: 10.2210/pdb1IGT/pdb.

Von der Antike bis in die Gegenwart trägt die Anfertigung von Anschauungs- und Funktionsprototypen zum Verständnis der komplexen Welt des Lebendigen bei. Leonardo da Vincis Zeichnungen von Organen und Körperteilen mit Feder, Tinte und Rötel sind unbestritten kunstvoll und der Vergleich des seinerzeit erfassten Wissens mit der modernen Anatomie ist längst gewürdigt [1]. Die im Josephinum in Wien ausgestellten Wachsmodelle wirken im Zeitalter moderner Anatomieatlanten und online verfügbarer Bodybrowser eher altmodisch und weit entfernt von den aus industriellen Prozessen bekannten additiven Fertigungstechniken wie dem 3D-Druck.

Unter dem Begriff der Additiven Fertigung werden einige innovative Verfahren und Anwendungen zusammengefasst, die im industriellen Zusammenhang längst bei der

Herstellung von Formen und Werkzeugen, der Anfertigung von Prototypen sowie bei der Massenproduktion von Endprodukten etabliert sind. Die ersten additiv gefertigten Ferienunterkünfte werden vermietet. Ein Urlaub im 3D-gedruckten Tiny-House ist also keine Zukunftsvision mehr. Ob dann im sogenannten Fibonacci-Haus [2] auch ein 3D-Lebensmitteldrucker zum Kücheninventar gehört, der zum Drucken von Pizza oder Schokoladennachspeisen benutzt werden kann, ist nicht auszuschließen.

In vielen Bereichen wird die 3D-Technologie zunehmend erfolgreich eingesetzt. In der Medizin schreitet die Entwicklung von Implantaten und Prothesen rasant voran. In der Pharmazie könnten in Zukunft mit dem 3D-Drucker personalisierte Medikamente produziert werden, die abhängig von der Tageszeit Pillen mit unterschiedlicher

Dosierung von verschiedenen Wirkstoffen in individueller Zusammensetzung drucken [3]. Im 3D-Universum der Biologie wird mit hohem Aufwand in Forschungslaboratorien an Biotinten mit lebenden Zellen geforscht, aus denen künftig mit 3D-Druck Gewebe und Organe gefertigt werden sollen [4]. Ohne großen Aufwand kann jeder schon heute biologische Objekte und Funktionsmodelle mit 3D-Druck kostengünstig selbst herstellen. Was auf den ersten Blick in der Biologie eher als Fiktion und Nischenphänomen angesehen werden könnte, wird im Folgenden in seiner Bandbreite ausführlich dargestellt und in seiner Bedeutung für Lehre und Forschung in der Biologie hervorgehoben.

Additive Fertigung – Serienproduktion biologischer Modelle von klein bis groß

Vereinfacht kann die Additive Fertigung als 3D-Druck verstanden werden, durch den dreidimensionale Objekte erzeugt werden. Dabei umschreibt der 3D-Druck eine Vielzahl technischer Verfahren, die im Jahr 2012 nach den Standards der *American Society for Testing and Materials* klassifiziert wurden (eine Übersicht findet sich in Kasten „Einstieg ins 3D-Universum“). Grob unterscheiden sich das 3D-Schmelzschichtverfahren (FDM, FFF) mit geschmolzenem und die Stereolithografie (SLA, STL) sowie das *Digital Light Processing* (DLP) mit flüssigem Material und der 3D-Druck mit Pulver (3DP, SLS). Knapp jeder fünfte Bundesbürger (18 %) hat im Jahr 2017 schon selbst einmal einen 3D-Druck angefertigt oder anfertigen lassen [5].

Nicht alle technischen Verfahren des 3D-Drucks, wie sie im Normentwurf DIN EN ISO/ASTM 52900:2018 aktuell gelistet sind, finden in der Biologie eine Anwendung. Eine Stärke des 3D-Drucks ist jedoch die Möglichkeit, komplexe 3D-Formen herzustellen. So können mit einfachsten Mitteln kleine Serien von unterschiedlichsten biologischen Modellen, von den Skelettelementen eines Schädels bis zu den Organen der Blüte mittels FDM-3D-Drucker (Abbildung 1) produziert werden.

Beim FDM wird das biologische Objekt schichtweise aus einem schmelzfähigen Material aufgebaut. In der Regel ist das Ausgangsmaterial ein Kunststofffaden, das sogenannte Filament, das auf einer Spule aufgewickelt wird. Die Materialauswahl reicht von biologisch abbaubaren Kunststoffen wie PLA bis hin zu Filamenten, denen Holzfasern oder verschiedene Karbone oder Metalle beigelegt sind. Wie die Tinte im Tintenstrahl-Druckkopf wird das Filament durch einen Extruder (*cold end*) mechanisch in das sogenannte *hot end* geschoben, bis aus der heißen Düse das geschmolzene Filament austritt. Je nach Filament wird die Düse (*nozzle*, Standard-Durchmesser 0,4 mm) auf einen konstanten Wert zwischen 190 bis 230 Grad Celsius geheizt.

Das *hot end* wird mit zwei Motoren so bewegt, dass das verflüssigte Plastik in einer wenige μm dicken Schicht auf die Grundplatte in x- und y-Richtung der Ebene als Basis aufgetragen wird (Abbildung 1a). Die Fertigung der

ersten Schicht ist der kritischste Schritt des gesamten Druckverfahrens, da der FDM-3D-Druck nicht gelingen wird, wenn die erste Schicht nicht haftet oder sich die Basis an den Ecken abhebt (*warping*-Effekt). Das *warping* kann durch die richtige Temperatureinstellung der beheizten Grundplatte vermieden werden. Die Druckgeschwindigkeit und die Temperatur des *hot end* sollte den Materialeigenschaften des Filaments optimal angepasst werden. Schließlich wird das Filament im Falle eines Ortswechsels zu anderen Objektpositionen vom Extruder schnell zurückgezogen, um eine Fadenbildung (*stringing*) oder ein Nachsickern zu verhindern. „Haarige Drucke“ mit kleinen Fäden auf dem gedruckten Modell, wie sie auftreten, wenn das Filament trotz Retraktion aus der Düse weiterfließt, während der Extruder sich zu einem anderen Ort des Objektes bewegt, lassen sich so vermeiden.

Ob sich nach der Herstellung der ersten Schicht die Druckplatte oder der Druckkopf mit dem *hot end* in die dritte Dimension der z-Richtung bewegt, um die nächste und folgenden Schichten sequenziell zu drucken, ist vom Typ des 3D-Druckers abhängig. In jedem Fall ist die Qualität des 3D-Druckes durch die Güte der verbauten Motoren bedingt, denn auch die Bewegung in die dritte Richtung des Raumes erfolgt in kleinen Schritten im μm -Bereich und muss sehr gut geregelt sein. Wird während der additiven Fertigung bei einem FDM-3D-Drucker manuell oder automatisch das Filament gewechselt oder besitzt der 3D-Drucker mehrere Düsen, können die biologischen Objekte nicht nur mit verschiedenfarbigen Filamenten, sondern relativ simpel auch mit unterschiedlichen Struktureigenschaften, zum Beispiel Holz- oder Kalk-ähnlich, hergestellt werden.

Die Additive Fertigung ist folglich kein Zauberwerk. Die Anschaffungskosten für einen eigenen 3D-Drucker an einem Arbeitsplatz sind überschaubar. Dabei sollte mit einem niedrigen vierstelligen Bereich gerechnet werden. Die Investitionsmittel können weiter gesenkt werden, wenn der 3D-Drucker als Bausatz angeschafft wird. Jedoch

IN KÜRZE

- Die Herstellung einer Vielzahl von biologischen 3D-Modellen ist durch die Anwendung **des additiven Verfahrens des 3D-Drucks** relativ einfach möglich.
- Die Grundlage des Druckplans liefern **verschiedene Datenbanken**, die jedem Internetbenutzer frei zugänglich sind.
Mithilfe eines 3D-Scanners oder Tomographie-Datensätzen aus 3D-Bilddatenbanken können reale Objekte in ein **Maschennetzwerk** transformiert werden. Ein solches **virtuelles 3D-Computermodell** kann dann nach Segmentierung mit dem 3D-Drucker zum realen Funktionsmodell gedruckt werden.
- Bei der Anfertigung von **biomedizinischen Prothesen und Implantaten** spielt der 3D-Druck zunehmend eine wichtige Rolle.

ist von preiswerten Importgeräten abzuraten, da technischer Support und die Erfahrungen aus einer großen Nutzergemeinschaft bei der Anwendung der Additiven Verfahren nicht vernachlässigt werden sollten. Der Trend geht zweifellos zum *open workspace*, in dem sich mehrere Personen, Arbeitsgruppen oder Institute verschiedene, professionelle 3D-Drucker teilen oder leasen. Wer bei 3DP- oder SLS-Verfahren mit starken Laserblitzen und Funken bestimmte Stellen einer Pulverschicht durch Erhitzen und Druck zu einem festen Stück eines biologischen 3D-Objektes sintern oder beim Einsatz eines SLA-3D-Drucker mit flüssigen Gefahrstoffen umgehen will, hat im *open workspace* die Beauftragten für Arbeits- und Strahlenschutz sowie die Fachkraft für Gefahrstoffe an seiner Seite. Schließlich sind diese anspruchsvolleren Additiven Verfahren aber auch jedem individuell zugänglich, wenn

der Weg über die *craftcloud3d*® (<https://craftcloud3d.com/>) zu einem der zahlreichen 3D-Dienstleister im Internet gewählt wird. Dazu muss das gewünschte biologische 3D-Projekt mit Angabe der Stückzahl, der Materialeigenschaften, der Skalierbarkeit, der Lieferzeit und dem Lieferort zum Beispiel zum Dienstleister 3D-Xpress transferiert werden, der das 3D-Objekt dann mit High-End-3D-Druckern individuell anfertigt oder in sogenannten Druckfarmen als Massenware produziert. Das hat seinen Preis, der bis zu hundert Mal höher liegt als die Kosten bei der eigenen Herstellung, und kann den Spaßfaktor bei der Fertigung im *workspace* nicht ersetzen.

Neben den 3D-Druck-Services finden sich im *World Wide Web* ergiebige Quellen für eine Vielzahl biologischer 3D-Modelle. In verschiedenen Datenbanken lagern die entsprechende Daten in *Standard Triangle Language*

EINSTIEG IN DAS 3D-UNIVERSUM

Additive Verfahren 3D-Druck

FDM/FFF: Fused Deposition Modeling- oder Fused Filament Fabrication-3D-Drucker benutzen einen auf eine Spule gewickelten Kunststofffaden. Der Faden wird im Druckkopf geschmolzen und schichtweise auf eine Druckplattform gedruckt.

SLA/STL/DLP: Stereolithographie- oder Digital Light Processing-3D-Drucker verwenden eine Lichtquelle, um flüssiges Harz in ausgehärteten Kunststoff zu transformieren.

SLS/3DP: Selektives Laser-Sintern oder Pulver-3D-Drucker arbeiten mit einem Laser, der aus pulverförmigen Ausgangsstoff unter erhöhtem Druck und Hitze durch Sintern räumliche Strukturen herstellt.

Druckmaterial

PLA: Polylactid ist ein auf nachwachsenden Rohstoffen wie Zuckerrohr oder Mais basierender Polyester.

ABS: Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer ist ein Thermoplast und zählt zu den technischen Kunststoffen.

Dateiformate von 3D-Daten, die am häufigsten für den Austausch der CAD-Modelldateien für den 3D-Druck verwendet werden

STP/STEP – Standard for the Exchange of Product model data

AMF – Additive Manufacturing File Format

3MF – 3D Manufacturing Format

STL – Standard Triangulation Language

OFF – Object File Format

PLY – Polygon File Format

OBJ – Object von Wavefront Technologies

DICOM – Digital Imaging and Communication in Medicine

DXF – Drawing Exchange Format und DWG

Datenbanken

Protein Databank: <https://www.rcsb.org/>

Sketchfab: <https://sketchfab.com/feed>

Turbosquid: <https://www.turbosquid.com/de/3d-models/male-female-anatomy-set-model-1418739>

Thingiverse: https://www.thingiverse.com

African Fossils: <https://africanfossils.org>

Paleontological Research Institution:
<https://www.digitalatlasofancientlife.org>

Smithsonian's Office: <https://dpo.si.edu>

Naturhistorisches Museum Wien:
https://www.nhm-wien.ac.at/museum_online/3D

Digitales naturhistorisches Archiv Darmstadt:
<https://www.dinarda.org>

NIH 3D Print Exchange supported by the National Institutes of Health: <https://3dprint.nih.gov>

MorphoSource: <https://www.morphosource.org/>

Software

Inkcape. Draw freely: <https://inkscape.org/de/>

FreeCAD: Your own 3D parametric modeler.
<https://www.freecad.org/>

Tinkercad: <https://www.tinkercad.com/>

AutoCAD: <https://www.autodesk.de/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Fusion 360: <https://www.autodesk.de/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Blender: <https://www.blender.org/>

APP Polycam: <https://apps.apple.com/de/app/polycam-lidar-3d-scanner/id1532482376>

Chimera: <https://www.cgl.ucsf.edu/chimera/>

ExScan Pro: <https://www.einscan.com/>

RadiAnt DICOM Viewer: <https://www.radiantviewer.com/dicom-viewer-manual/exporting-3d-models.html>

democratiz3D. <https://www.embody3d.com/democratiz3d/>

Meshmixer. <https://meshmixer.com>

FlashPrint. Slicer for Flashforge FDM 3D Printers:
<https://www.flashforge.com/product-detail/FlashPrint-slicer-for-flashforge-fdm-3d-printers>

PrusaSlicer: https://www.prusa3d.com/de/page/prusaslicer_424



ABB. 1 Biologische Modelle durch 3D-Druck. a) Aufsicht auf die in x-Richtung bewegliche Druckplatte und den in y-, z-Richtung beweglichen Druckkopf. b) Schichtweises Drucken des Modells eines Schädels mit dem entsprechenden Stützmaterial. c) Schädelmodell und Original. Einfaches, farbig gedrucktes Modell eines Bakteriums (d), einer Pflanzenzelle (e) und einer tierischen Zellform (f). Fotos: H. Böhm.

(STL) oder verwandten Dateiformaten (OFF – *Object File Format*, PLY – *Polygon File Format*), die unmittelbar zu den 3D-Dienstleistern geschickt oder selbst mit dem eigenen 3D-Drucker gedruckt werden können. Auf der systematischen Suche nach druckbaren 3D-Modellen der Biologie mit dem Schwerpunkt Pflanzen, Tiere und Zellstrukturen wird eine Anmeldung bei cult3d, Sketchfab oder Thingiverse und Turbosquid nicht zu vermeiden sein. Ganz nebenbei finden sich dort auch die Daten zum Ausdruck von verschiedenen Gegenständen und Gebrauchsmaterialien eines jeden Biolabors wie etwa Pipetten- oder Reagenzständer. Um die beeindruckenden 3D-Objekte der Schädel der *African Fossils*, die fossilen Exemplare des *Digital Atlas of Ancient Life* oder dem *Smithsonian Institution's Office* und des Naturhistorischen Museums Wien sowie des *Archive of Natural History* und anderer Anbieter mit dem 3D-Drucker selbst zu drucken, genügt ein Besuch der entsprechenden Internetseiten.

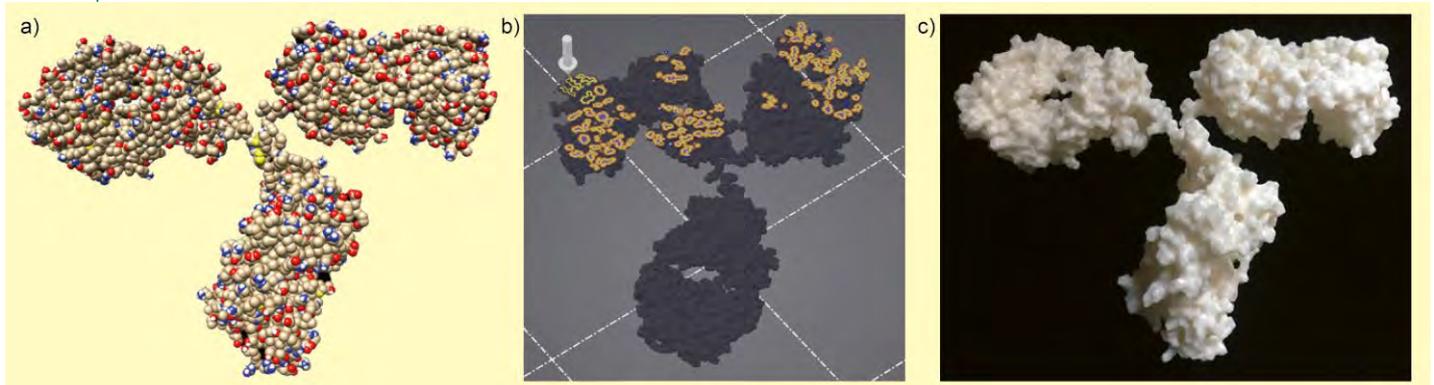
Schon einige Jahre ist bekannt, dass eine kleine Sammlung biologischer 3D-Modelle für Wissenschaft und Bildung in kurzer Zeit preisgünstig und nachhaltig aufgebaut werden kann [6]. Unzählige 3D-Modelle von Molekülen lagern in den unterschiedlichen Struktur-Datenbanken für Proteine oder Gensequenzen. Im einfachsten Fall hilft die Internetadresse des *National Institutes of Health*, um mit Hilfe des *NIH 3D Print Exchange* die Kollektion der dort

direkt zum 3D-Druck angebotenen Modelle zu erforschen. Etwas aufwändiger ist der 3D-Druck von Biomolekülen, deren Struktur in der *GenBank*[®] oder *Protein Data Bank* hinterlegt ist. In der *RCSB Open-Access-PDB* findet sich aber nicht nur eine Anleitung der 3D-Visualisierung der Moleküle über die *Open-Source-Software* Chimera 1.13.1, sondern auch eine kurze Anleitung zum Entwerfen und Anfertigen genauer Molekülmodelle mit dem 3D-Drucker. Damit alle Schritte des Herstellungsprozesses von 3D-Molekülmodellen erfolgreich durchgeführt werden können, ist eine detaillierte Gebrauchsanweisung für das 3D-Drucken von Biomolekularmodellen inklusive Videomaterial empfehlenswert [7] (Abbildung 2).

3D-Scanner: Vermittler zwischen realem Objekt und 3D-Druck

In der Praxis ist ein 3D-Drucker nur das letzte ausführende Gerät bei der Herstellung von dreidimensionalen biologischen Modellen (Abbildung 3). Notwendige Voraussetzung für den Druckprozess ist zuerst einmal die Idee für den Druckplan, die Blaupause. Der Druckplan selbst kann auf sehr unterschiedliche Weisen – von einfach bis komplex – generiert werden. Im einfachsten Fall kann der Druckplan aus einer der genannten und im Anhang gelisteten Datenbanken heruntergeladen werden. Mit der Beherrschung von CAD-Programmen, wie den freien

ABB. 2 | MAKROMOLEKÜLE AUS DER PROTEINDATENBANK



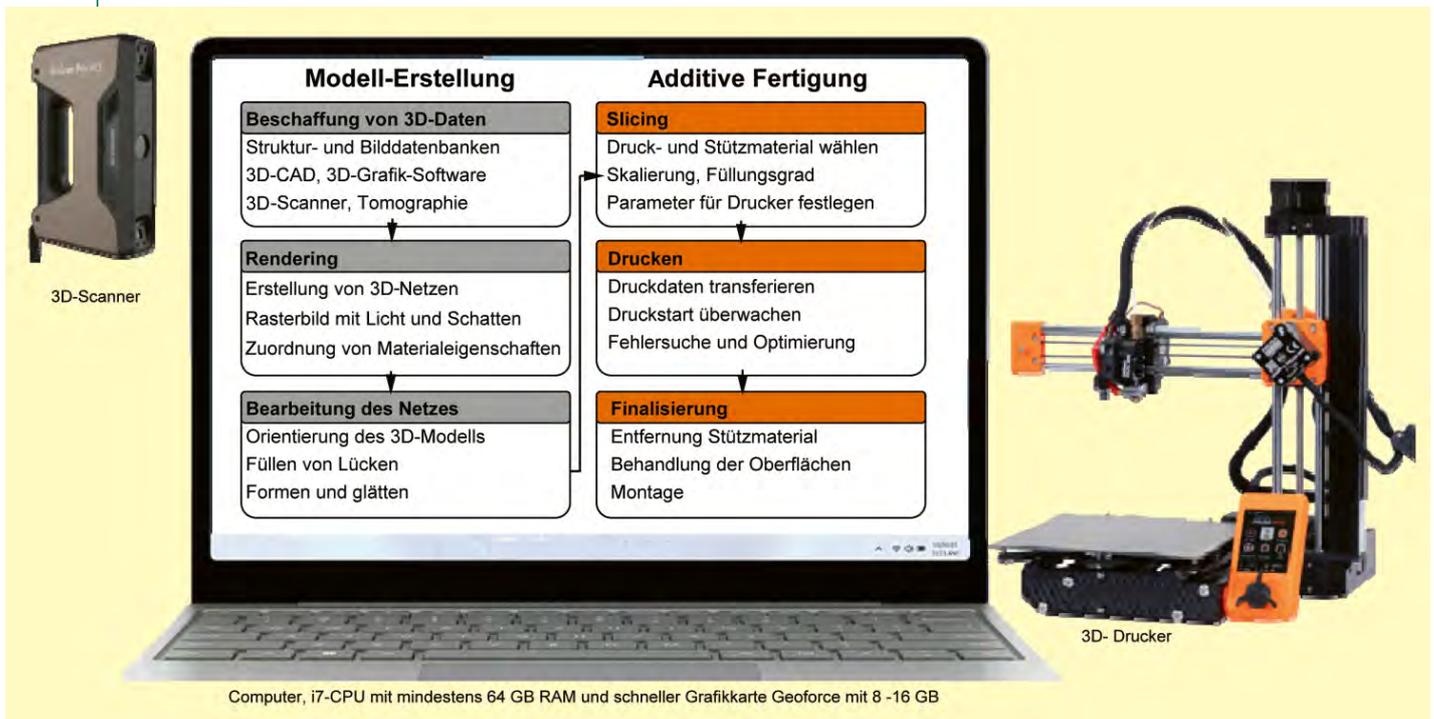
a) Datensatz des Immunglobulins IgG2a vor dem Rendern, das zur endgültigen Fertigstellung des 3D-Objektes seine Oberflächenstruktur, den Farbverlauf oder die Lichtquellen berechnet. **b)** Der *Slicer* zerschneidet das Modell in Druckschichten von je 150 µm, die über das *hot end* (heiße Düse, hier weiß über dem Modell) innerhalb von 2 Tagen 22 Stunden und 22 Minuten gedruckt werden können. **c)** Das etwa 20 cm hohe Modell des IgG2a-Antikörpers kann aus PLA (oder ABS) sowie anderen Materialien in skalierbarer Größe mit 3D-Druck so oft wie gewünscht gefertigt werden. Fotos: H. Böhm.

FreeCAD oder *TinkerCAD* bis hin zur professionellen *AutoCAD* oder der cloudbasierten Softwareplattform *Fusion 360* sowie der freien *Open 3D Creation Software Blender*, ist es außerdem möglich, einen Druckplan für eigene biologische 3D-Objekte selbst zu konstruieren. Die detailgetreue zeichnerische 3D-Restruktion eines biologischen Objektes ist in der Regel sehr zeitintensiv und wird trotz der anspruchsvollen Techniken nicht in jedem Fall

den anatomischen und strukturellen Details des realen biologischen Objektes gerecht.

Schließlich kann zur Generierung eines Druckplanes ein 3D-Scanner eingesetzt werden, der Daten über die Form, Farbe, Oberflächenstruktur und damit das Aussehen eines biologischen Vorbildes liefert. Beim 3D-Scannen wird das komplexe Objekt in der Regel mit Hilfe von Lichtstrahlen und von deren Reflexionen in ein digitales

ABB. 3 | VON DER IDEE ZUR FERTIGUNG EINES 3D-MODELLS



Arbeitsablauf von der Idee eines biologischen 3D-Objektes zum Druck eines 3D-Modells. Die Schritte zur Fertigung eines physischen 3D-Drucks eines biologischen Modells beginnen mit der Beschaffung des Modells, einschließlich der Auswahl der Darstellung, gefolgt vom Öffnen einer 3D-Datei des Modells und Rendering, Bearbeiten des Netzes vor der Additiven Fertigung. Nach der Auswahl des Materials und dem Einsatz der *Slicer*-Software sowie dem Druck des Modells enden die Tätigkeiten schließlich mit der Nachbearbeitung. Abb. modifiziert nach [7]: CC BY 4.0.

Modell übertragen. Dabei entsteht für jeden Lichtpunkt ein Datenpunkt in einer Datenwolke. Aus der Datenwolke kann dann das digitale 3D-Modell durch ein Netz von Dreiecken (*mesh*) erstellt werden, dessen Genauigkeit und Präzision von dem Auflösungsvermögen des 3D-Scanners und der Anzahl der erfassten Punkte abhängt.

Die Typenvielfalt der 3D-Scanner ist kaum überschaubar und wächst stetig. Mit 3D-Scannern werden reale Objekte komplett durch 3D-Rekonstruktion in eine Art globale digitale Alternative zur physischen Welt, dem sogenannten Metaversum, transformiert. Die Anschaffungskosten für einen 3D-Scanner können leicht fünfstellig werden. Häufig reicht aber schon ein Mobiltelefon mit einem LiDar-Sensor (*Light detection and ranging*) aus, um selbst in die virtuelle „Realität“ einzutauchen und eigene biologische 3D-Objekte zu generieren. Der LiDar-Sensor eines aktuellen iPhones macht dieses Mobiltelefon zusammen mit der kostenfreien APP *Polycam* zu einem 3D-Scanner, der Objekte und ganze Räume dreidimensional erfasst und die selbsterstellten 3D-Modelle anschließend in ein Datenformat exportiert, das als Blaupause für den 3D-Druck des Objektes dient.

Hochpräzise 3D-Scanner werden nicht nur im Bereich des *reverse engineering* in der industriellen Fertigung und Prozessoptimierung eingesetzt; auch in der Medizin liefert der 3D-Scanner mittlerweile in Hülle und Fülle 3D-Datenmaterial. Mit wachsendem Interesse wurden von 2010 bis 2020 tragbare 3D-LiDar-Scanner beim Umweltmonitoring in Forst-, Agrar- und Umweltwissenschaften benutzt [8]. So eröffnet der Einsatz eines 3D-Scanners bei der Digitalisierung von Biodiversität eine neue Perspektive. Denn weltweit werden 3D-Scanner benutzt, um naturwissenschaftliche Sammlungen dreidimensional zu archivieren und diese dadurch der Öffentlichkeit orts- und zeitunabhängig zur Verfügung zu stellen (Abbildung 4). Darüber hinaus können die digitalen Belegexemplare (sogenannte Holotypen) als *template* für die automatisierte Erfassung aller im Lebensraum zu detektierenden Individuen dieser Spezies benutzt werden. An jedem Ort der Erde ist das 3D-Modell eines Holotyps nicht nur am Bildschirm zu betrachten, sondern ermöglicht darüber hinaus den dreidimensionalen Druck von einem exakten Abbild des Exemplars. Selbst bei einer nur 1,5 Millimeter messenden Fliege stellt der sogenannte Darmstädter Insektenscanner DISC3D [9] phänotypische Bestimmungsmerkmale wie zum Beispiel Härchen, Flügelstrukturen oder Farben detailliert dar. Alle technischen Informationen dieses 3D-Insektenscanners DISC3D sind frei verfügbar (<https://www.dinarda.org/disc3d>), so dass der 3D-Scanner im Prinzip von jedem nachgebaut werden kann.

Seit Entdeckung der Röntgenstrahlen erlauben diese die Darstellung eines Bildes aus dem Inneren eines lebenden Organismus. Durch Einsatz der Computertomographie ist daher nicht nur eine diskrete volumetrische 3D-Darstellung eines lebendigen Menschen möglich: Die unterschiedlichen Scanner in der Computertomographie

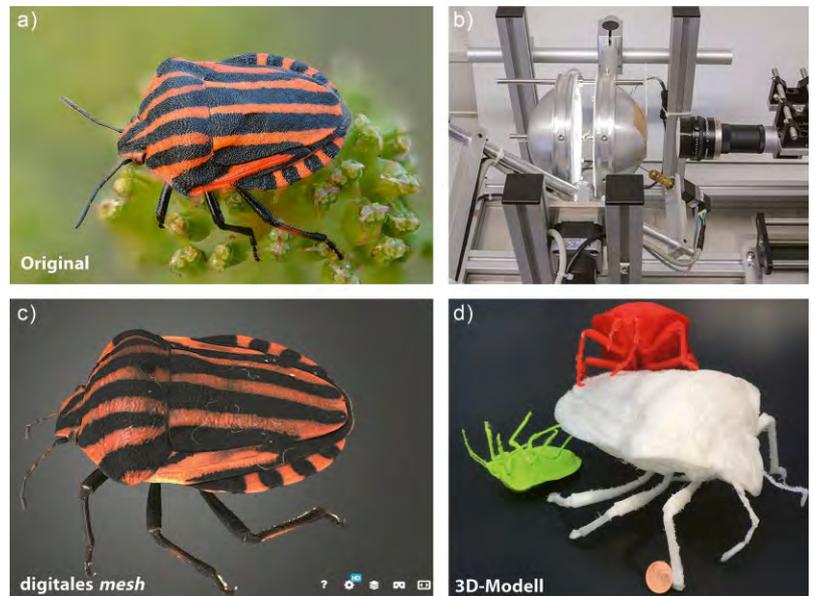
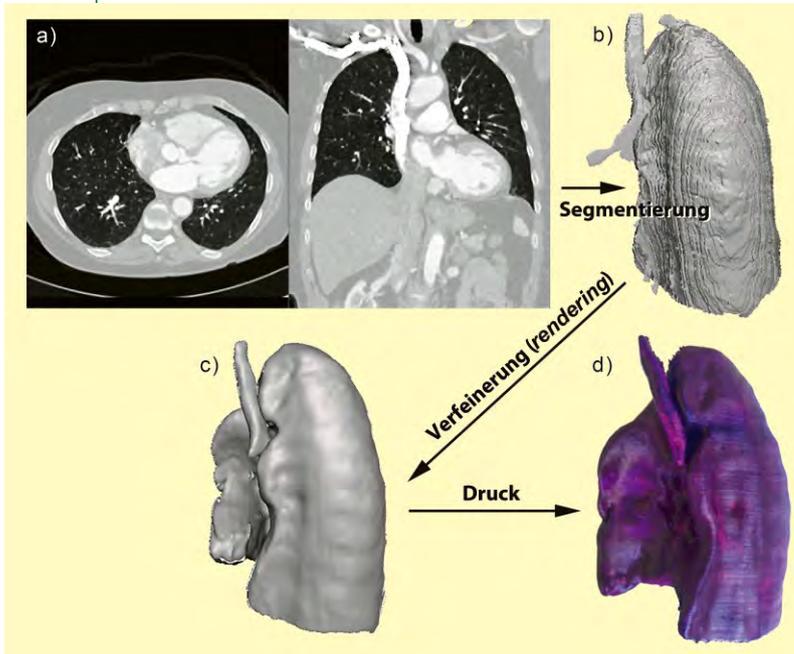


ABB. 4 3D-Insektenscanner zur Dokumentation der Biodiversität. a) Die Streifenwanze *Graphosoma italicum* mit einer Körperlänge von 12 mm. b) Der Darmstädter Insektenscanner DISC3D. Im Zentrum der halbkugelförmigen Beleuchtungskuppeln wird das Insekt mit LED-Licht beleuchtet. Mittels eines motorisierten zwei-achsigen-Kardanrings wird eine Serie von Bildern vollautomatisch aus praktisch jeder Perspektive aufgenommen. c) Das kalibrierte und farbgetreu texturierte 3D-Netzmodell der Streifenwanze resultiert aus dem Bildstapel und kann unter Verwendung einer herkömmlichen Software für Maschennetze editiert und in einen Datensatz zum 3D-Druck übersetzt werden. Die Daten für das Modell stammen aus dem *Digital Archive of Natural History (DiNArDa)*, <https://sketchfab.com/disc3d> CC BY 4.0. d) Mit einem FDM-3D-Drucker gefertigte Modelle der Wanze, die in 3-facher Vergrößerung in wenigen Stunden und bis zur 15-fachen Vergrößerung in wenigen Tagen gedruckt wurden. Fotos: a) Ivar Leidus, CC BY-SA 4.0c, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Graphosoma_italicum_-_Kulna.jpg. b) Modifiziert nach [9]: CC BY 4. c, d) H. Böhm.

erlauben zudem einzigartige Einblicke in die Struktur, die Funktion und den Stoffwechsel lebender Organe verschiedener Tiermodelle von der Maus bis zur Fliege. Die Mikro-Computertomographie ist heute in der Biologie nicht mehr wegzudenken [10]. So wurden unter Verwendung von Röntgenstrahlung aus der seriellen Abfolge von Bildschichten einer Hochgeschwindigkeitskamera dreidimensionale Darstellungen aus dem Inneren der arbeitenden Flugmuskeln von Fliegen erstellt, die Einzelheiten der Muskulatur der Fliege in einer Größenordnung von einigen Tausendstelmillimetern erkennen lassen [11]. Das Verständnis der dreidimensionalen Bewegungen des Flüggelagers der Fliege kann es ermöglichen, das komplexe Gelenk durch Einsatz Additiver Fertigung direkt für den Einbau in Mikrodrohnen zu produzieren. Darüber hinaus verbindet die sogenannte Chemo-Histo-Tomographie die 3D-Visualisierung von Stoffwechselprodukten und anatomischen Strukturen in millimetergroßen Tieren [12], die sich dann im 3D-Modell darstellen lassen.

Bei all diesen Untersuchungen werden die erfassten, digitalen Bilder visualisiert oder mit Hilfe von Algorithmen in die 3D-Oberfläche umgewandelt. Jede Bildschicht, un-

ABB. 5 | ARBEITSABLAUF VOM BILD ZUR PERSONALISIERTEN CHIRURGIE



Vom medizinischen Bild zum 3D-Druck – hier Verwendung von Computertomographen-Datensätzen (a) bei der Erstellung von Modellen von Rippen, Leber und Lunge. Nachdem die anatomische Struktur segmentiert wurde (b), muss die resultierende Oberfläche verfeinert werden (c), um Bildartefakte zu entfernen, und kann dann 3D-gedruckt werden (d). Abb. nach [13]: CC BY 4.

abhängig von der Art der Gewinnung durch Röntgen, CT, MRI, Ultraschall etc. wird nach dem internationalen Standard zur Speicherung medizinischer Bilder als primärer volumetrischer Datensatz in Form einer DICOM-Datei (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) gespeichert. In der Folge ist es leicht möglich, die Daten einer Dicom-Datei eines Scans in einen Druckfile zu wandeln und diesen dazu zu nutzen, um individuelle Modelle, Prothesen oder Knochen sowie Organe additiv zu fertigen (Abbildung 5, [13]). Ohne eigenen 3D-Scanner liefern 3D-Bilddatenbanken, wie *MorphoSource* mit weit über 67000 publizierten 3D-Modellen, die frei zugänglichen 3D-Daten, die die Naturgeschichte und die wissenschaftlichen Sammlungen der Welt darstellen. Solche Bilddatenbanken ermöglichen nicht nur das Teilen wissenschaftlicher Daten und vergleichende Forschungsstudien, sondern die öffentliche Verfügbarkeit erlaubt zudem jedem Internetnutzer die Betrachtung von kaum zugänglichen Skeletten oder Organen, die dann mit dem 3D-Drucker gefertigt werden können.

Um bei der additiven Fertigung von biologischen 3D-Modellen vor ungewünschten Überraschungen wie fehlenden Ebenen oder falschen Datenpunkten im Modell gewappnet zu sein, sollten die 3D-Daten jedoch vor dem Druck überprüft werden. Dazu dient in der Regel Software, die neben dem Generieren des Datennetzes auch

das Rendern der Objekte und den Export in die Druckdaten übernimmt. Daher sind einfache Kenntnisse über die *state of the art*-Software *Mesbmixer* gefordert, die das Editieren oder Orientieren der Daten des *mesh* eines biologischen 3D-Objektes erlauben. Letztlich wird so zum Beispiel ein 3D-Scan des biologischen Objektes bereinigt und damit ein optimierter Druckplan erhalten. Bei diesem Arbeitsschritt wird oft deutlich, dass 3D-Objekte sogenannte Überhänge oder Elemente beinhalten, die einen Unterbau durch Stützmaterial erfordern.

Im letzten Schritt vor dem 3D-Druck werden deshalb die Orte sowie die Art des Stützmaterials zuzüglich des Materials, aus dem das Objekt gefertigt werden soll, mit der sogenannten *Slicer*-Software konfiguriert. Dabei werden die Dicke der Schichtebenen, die Größe des Objektes und dessen finale Orientierung auf der Druckplatte eingestellt. Ein guter 3D-*Slicer* generiert insbesondere bei Brücken und Überhängen automatisch Stützen, die dafür sorgen, dass der fertige Druck so präzise und genau wie möglich ist. Die Software ermittelt auch die Kosten, die in der Regel niedrig sind, einschließlich der oft mehrtätigen Druckdauer. Schließlich helfen ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen und einige Erfahrung mit Fehldrucken an dieser Stelle des *workflows*. Sind alle Parameter richtig an den 3D-Drucker vermittelt, sollte der Additiven Fertigung von 3D-Objekten, die ein exaktes Abbild des biologischen Objektes begreifbar machen, selbst für Anfänger in Farbe und skalierbarer Größe druckbar sein.

Wie entscheidend die exakte Herstellung von 3D-Objekten ist, offenbart sich eindrucksvoll bei der professionellen Anfertigung eines individuellen Implantats im Bereich der Kiefer- und Gesichtschirurgie. In diesem Fall erleichtert der Einsatz Additiver Technik die akkurate Rekonstruktion von Schädelknochen nach Verletzungen oder Krankheiten und verkürzt die Zeit von der Planung einer Operation bis zur finalen Rekonstruktion. Der *workflow* der Anfertigung eines Implantats von der Verarbeitung der 3D-Bilddaten der defekten Schädelseite, dem Entwurf des Implantats aus den anderen CT-Daten der intakten Schädelseite über den 3D-Druck des Schädel- und Implantatmodells sowie den Guss eines passgenauen Titan-Implantats führt nachweislich zu einem besseren Operationsergebnis, weniger Blutverlust, einer schnelleren Genesung und bietet so den Patienten ein besseres Leben [14].

An verschiedenen Kliniken existieren erste Zentren, in denen ein multidisziplinäres Team zwischen Fachkräften der Chirurgie, IT und Verwaltung zusammenarbeiten. Somit kann in der Biomedizin und Biologie schon jetzt gezeigt werden, wie 3D-Objekte durch digitale Technologien miteinander vernetzt und durch 3D-Druck einer größeren Gemeinschaft zur Verfügung gestellt werden können. Es bleibt abzuwarten, welche Chancen oder Risiken die Additive Fertigung in der Zukunft bei der sogenannten Biofabrikation bringen wird.

Zusammenfassung

Die Anfertigung von Anschauungs- und Funktionsprototypen biologischer Objekte trägt maßgeblich zum Verständnis der komplexen Welt des Lebendigen bei. In den letzten Jahrzehnten werden zur Erfassung von biologischen Objekten zunehmend 3D-Techniken eingesetzt. Bei der Additiven Fertigung von dreidimensionalen Anschauungsmodellen ergeben sich einzigartige Einblicke in die dreidimensionale Struktur und die Funktion der untersuchten Objekte. Die digitale Transformation von biologischen Objekten in ein virtuelles 3D-Universum eröffnet vollkommen neue Möglichkeiten von der Erfassung der Biodiversität bis hin zur Produktion von Prothesen oder Organen.

Summary

3D Printing in Biology: From the biological model to a 3D universe.

The creation of visual and functional prototypes of biological objects contributes significantly to the understanding of the complex world of living things. In recent decades, 3D techniques have been increasingly used to capture biological objects. Additive manufacturing of three-dimensional visual models provides unique insights into the three-dimensional structure and function of the objects under investigation. The digital transformation of biological objects into a virtual 3D universe opens up completely new possibilities from capturing biodiversity to the production of prostheses or organs.

Schlagworte:

Additive Fertigung, 3D-Druck, 3D-Scanner, biologische Modelle. Rekonstruktion von Knochen und Organen

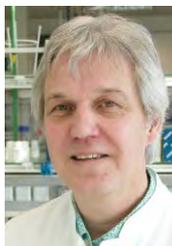
Danksagung

Ein Dank gebührt der Bayer Foundation für die im Rahmen des Schulförderprogrammes bewilligte Unterstützung des Projektes Bioprinting zur Ausstattung des *open workspace* am Berufskolleg Hilden des Kreises Mettmann – Europaschule.

Literatur

- [1] G. Hinterkeuser (2013). Leonardos Körperwelten. MaxPlanckForschung 2 | 13, 68.
- [2] Project gallery: Twente Additive Manufacturing. <https://www.twente-am.com/projects/>.
- [3] H. Schiffter-Weinle (2015). Die Tablette aus dem Drucker. Deutsche Apotheker Zeitung. DAZ 2015, Nr. 37, 60.
- [4] N. Noor et al. (2019). 3D Printing of Personalized Thick and Perfusible Cardiac Patches and Hearts. Adv. Sci. 2019, 6, 1900344, <https://doi.org/10.1002/advs.201900344> CC BY 4.0.
- [5] A. Berg (2017). 3D-Druck im Hausgebrauch. Umfrage des Digitalverbands, <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Bundesbuerger-sagen-3D-Druck-grosse-Zukunft-voraus.html>.
- [6] E. Canessa et al (2013). Low-cost 3D printing for Science, education sustainable development. ICTP-The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, ISBN 92-95003-48-9.
- [7] E. Da Veiga Beltrame et al. (2017). 3D Printing of Biomolecular Models for Research and Pedagogy. J. Vis. Exp. (121), e55427, <https://doi.org/10.3791/55427>.
- [8] F. Di Stefano et al. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: a literature review. Geomatics, natural hazards and risk 12, 2387–2429, doi.org/10.1080/19475705.2021.1964617.
- [9] B. Ströbel et al. (2018). An automated device for the digitization and 3D modeling of insects, combining extended-depth-of-field and all-side multi-view imaging. ZooKeys 759, 1–25.
- [10] S. Handschuh, B. Ruthensteiner (2022). Mikro-Computertomographie in der Biologie. Mit Röntgen in die dritte Dimension. Biol. Unserer Zeit 2, <https://doi.org/10.11576/biuz-5356>.
- [11] S. M. Walker et al. (2014). In Vivo Time-Resolved Microtomography Reveals the Mechanics of the Blowfly Flight Motor. PLoS Biol 12(3): e1001823, <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001823>.
- [12] B. Geier et al. (2021). Connecting structure and function from organisms to molecules in small-animal symbioses through chemo-histo-tomography. PNAS 118, e2023773118.
- [13] T. M. Bücking et al. (2017). From medical imaging data to 3D printed anatomical models. PLoS ONE 12, e0178540. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178540>
- [14] S. Singare et al (2016). The use of 3D printing technology in human defect reconstruction-a review of cases study. Med Res Innov. 1, <https://doi.org/10.15761/MRI.1000109>.

Verfasst von:



Hartmut Böhm studierte Biologie an der Albertus-Magnus-Universität zu Köln und promovierte 1987 am dortigen Zoologischen Institut. Nach drei Jahren am Max-Planck-Institut für Verhaltensforschung in Seewiesen arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent in der Abteilung Neurobiologie der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Nach Forschungsaufenthalten an der North-Eastern-University, Boston, und am CRNS, Arcachon, habilitierte er und erforschte die zellulären Grundlagen von neuronalen Netzen, bis er 2003 an das Berufskolleg Hilden des Kreises Mettmann – Europaschule wechselte. Dort war er als Abteilungsleiter unter anderem für die berufliche Ausbildung von Biologisch-technischen Assistenten tätig. Seit vielen Jahren engagiert er sich im Arbeitskreis Biologisch-technische Ausbildung des VBIO.

Korrespondenz

Dr. Hartmut Böhm
Berufskolleg Hilden des Kreises Mettmann
Am Holterhöfchen 34
40724 Hilden
Email: boehm@berufskolleg.de

Ursprung, Verbreitung und Umsetzung von Draußenunterricht

Draußenschulbewegung in Deutschland

JAKOB VON AU | ULRICH GEBHARD



Unter dem Begriff Draußenlernen – seltener auch Draußenschule, Draußenunterricht oder Lernen im Freien – formiert sich derzeit eine Graswurzelbewegung in Deutschland, die den Horizont der Schule sprichwörtlich erweitern möchte. Woher kommt diese Bewegung? Was genau kann man unter Draußenlernen verstehen und wie verbreitet ist es bereits? Weshalb plädieren immer mehr Forscher/-innen und Pädagog/-innen dafür? Und vor allem: Wie kann man es im Schulalltag gewinnbringend verankern?

Schulunterricht spielt sich in Deutschland bisher zum allergrößten Teil im Klassenzimmer ab, insbesondere im Sekundarschulbereich. Die meisten Kinder haben am Ende ihrer Schullaufbahn über 10.000 Stunden sitzend in Klassenzimmern verbracht. Selbst im Biologieunterricht werden Inhalte oft ausschließlich im Klassenzimmer über Schulbuch und Tafel oder neuerdings über Tablet und Whiteboard vermittelt. Lehr-Lern-Situationen außerhalb des Klassenzimmers beschränken sich an den meisten Schulen auf wenige Exkursionen oder Sonderanlässe und finden über das Schuljahr gesehen nur punktuell statt.

In anderen Ländern ist der Anteil an Unterricht außerhalb des Klassenzimmers an vielen Schulen deutlich höher als in Deutschland. In Schottland und Neuseeland beispielsweise werden Naturerfahrungen in der Schule von den Bildungsministerien intensiv gefördert. Das schottische Bildungsministerium hat 2010 das *Curriculum for Excellence through Outdoor Learning* veröffentlicht, in dem steht, dass *outdoor learning* im Schulunterricht wesentlich dazu beitragen kann, dass Lernende „smarter“, „healthier“, „stronger“ und „fairer“ werden. In Neuseeland wurde 2016 das Bildungsplandokument *Education Outside the Classroom Guidelines* an alle Lehrpersonen ausgegeben, um diese zu mehr Unterricht im Freien zu bewegen und dadurch unter anderem Kreativität, Neugierde und nachhaltiges Handeln bei Lernenden zu fördern [1].

Besonders progressiv in Sachen Draußenlernen ist Dänemark. Dort hat sich um die Jahrtausendwende unter dem Begriff *Udeskole* eine starke Draußenschulbewegung entwickelt. Die Bewegung wurde teilweise vom skandinavischen Konzept des ► *Friluftsliv* inspiriert. *Friluftsliv* beschreibt eine Lebenshaltung, die sich durch Naturnähe auszeichnet und ein Leben in und mit der Natur propagiert. Ausgehend davon bildete sich in den letzten Jahren eine eigenständige, bildungsplanbasierte Unterrichtsform außerhalb des Klassenzimmers heraus, die heute sowohl in der Praxis als auch in der Forschung als *Udeskole* bezeichnet wird.

Udeskole wurde zunächst vereinzelt von mutigen Lehrpersonen nach eigenen Vorstellungen in Schulen eingeführt und mit wenigen Klassen umgesetzt. Schritt für Schritt organisierten sich engagierte Einzelpersonen in einem

Udeskole-Netzwerk und konnten auf diese Weise viele weitere Lehrpersonen für diese innovative Unterrichtsform des Draußenunterrichts begeistern. Nach einiger Zeit wurde die Wissenschaft darauf aufmerksam und konnte positive Wirkungen von *Udeskole* empirisch fundieren. Und schließlich war auch das Bildungsministerium von *Udeskole* überzeugt und unterstützte die Bewegung auf vielfältige Weise [2].

Udeskole zeichnet sich durch Vielfältigkeit aus und wird von Person zu Person geringfügig unterschiedlich interpretiert. Aus diesem Grund fällt eine Definition schwer. Um das Phänomen für Wissenschaft und Praxis trotzdem handhabbar zu machen, wurden in Dänemark für *Udeskole* folgende Merkmale festgelegt:

- 1) lehrplanbasierte Lehr- und Lernaktivitäten außerhalb des Klassenzimmers, aber innerhalb der Schulzeit,
- 2) settingsensitives, problembasiertes, erlebnisorientiertes Lernen,
- 3) schülerzentriertes, lehrpersonengeleitetes Lernen,
- 4) Einbezug von physischer Aktivität nicht als Ziel, sondern als Mittel zu pädagogischen und didaktischen Zwecken [1].

In Dänemark ist *Udeskole* inzwischen landesweit verbreitet und wird ungefähr an jeder fünften allgemeinbildenden und jeder dritten Förderschule intensiv praktiziert [3]. Davon ist Deutschland noch weit entfernt. Es gibt jedoch immer mehr Hinweise darauf, dass sich Draußenlernen in Deutschland derzeit stark ausbreitet (Abbildung 1). In den letzten Jahren wurden beispielsweise einige spezifische ► Draußenschulen eröffnet, und 2020 wurde das ► „Netzwerk Draußenunterricht“ gegründet. Einen kleinen Eindruck von dieser Entwicklung erhält man auf der Website www.draussenunterricht.de. In einer Karte auf dieser Website (<https://draussenunterricht.de/karte>) wurden bereits deutlich über 100 Schulen und weitere Institutionen verzeichnet, die ausgehend von den oben genannten Kriterien Draußenunterricht praktizieren (Stand: März 2023). Es ist davon auszugehen, dass viele Schulen mit fest etabliertem Draußenunterricht in dieser Erhebung noch nicht erfasst wurden und dass die tatsächlichen Zahlen noch deutlich höher sind und mittelfristig auch weiter zunehmen werden. Die starke Zunahme der verzeichneten Schulen über die letzten Monate hinweg deutet darauf hin, dass Deutschland einen ähnlichen Weg wie Dänemark beschreiten könnte.

Wir wollen im Folgenden darstellen, weshalb sich immer mehr Pädagog/-innen und Forscher/-innen für Draußenlernen einsetzen und exemplarisch zwei unterschiedliche Formen des Draußenlernens in Deutschland skizzieren.

Natur tut Kindern und Jugendlichen gut

Eine zentrale Begründung für das Draußenlernen ist, dass Natur Kindern und Jugendlichen gut tut und deshalb auch in der Schulzeit ein guter Rahmen sowohl für die Persönlichkeitsentwicklung als auch für Lern- und Bildungsprozesse ist. Natürliche Strukturen haben eine Vielzahl von

Eigenschaften, die für die seelische Entwicklung gut sind [4]: Die Natur verändert sich ständig und bietet zugleich Kontinuität. Sie ist immer wieder neu (z. B. im Wechsel der Jahreszeiten) und doch bietet sie die Erfahrung von

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 186 erklärt.



ABB. 1 Biologieunterricht vor Ort: Kinder auf dem Weg zum Lernort im Wald.

IN KÜRZE

- Draußenschule bzw. Draußenunterricht ist z. B. in Dänemark unter dem Begriff *Udeskole* bereits **weit verbreitet**.
- In den letzten Jahren formiert sich auch in Deutschland **eine Draußenschulbewegung**.
- Im Netzwerk www.draussenunterricht.de haben sich schon **über 100 Schulen** als Draußenschule in Deutschland registriert.
- Draußenlernen kann sich **positiv auf die Persönlichkeitsentwicklung**, auf Wohlbefinden und Gesundheit, auf soziale Beziehungen und auf Einstellungen im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung **auswirken**.
- Die wissenschaftliche Begleitung des Heidelberger Outdoor-Education-Projekts hat darüber hinaus gezeigt, dass **Bildungsplaninhalte in Biologie** und weiteren Fächern draußen erfolgreich umgesetzt werden können, dass **Lernmotivation** und **Bewegungsaktivität ansteigen** und **belastender Stress reduziert** werden kann.
- Umsetzungsbeispiele an der Laborschule Bielefeld und am Gymnasium Englisches Institut in Heidelberg zeigen die beiden Pole des weiten **Spektrums von Umsetzungsmöglichkeiten** zwischen weitgehend freiem und stark bildungsplanorientiertem Draußenlernen auf.

Verlässlichkeit und Sicherheit. Beim Menschen gibt es sowohl einen grundlegenden Wunsch nach Bindung und Vertrautheit als auch ein ebenso grundlegendes Neugierverhalten. Beide Grundbedürfnisse können bei Naturerlebnissen realisiert werden.

Zusätzlich gibt es viele Hinweise für gesundheitsfördernde Wirkungen von Natur: Naturräume mit Wiesen, Feldern, Bäumen und Wäldern haben eine belebende Wirkung bzw. ermöglichen eine Erholung von geistiger Müdigkeit und Stress. Der Zusammenhang von Naturerfahrungen und Gesundheit wird häufig mit evolutionären Annahmen in Verbindung gebracht (► Biophiliehypothese). Nach der ► *Attention Restoration Theory* wirken Naturräume deshalb günstig auf die Gesundheit, weil sie eine Erholung verbrauchter Aufmerksamkeitskapazität bewirken. Nach dem ► Salutogenesekonzept sind Gesundheit und Krankheit keine puren Entgegensetzungen. Menschen bewegen sich danach stets in einem Kontinuum zwischen den Polen Gesundheit und Krankheit. Gesundheit wird danach auch subjektiv erzeugt. Dabei spielt das sogenannte Kohärenzgefühl eine zentrale Rolle. Es drückt die subjektive Überzeugung aus, dass das Leben verständlich (Verstehbarkeit), beeinflussbar (Handhabbarkeit) und bedeutungsvoll (Sinnhaftigkeit) ist. Das Kohärenzgefühl kann durch Naturerfahrungen, durch Aufenthalte in der freien Natur, im Garten und im Kontakt mit Tieren unterstützt werden und damit die Möglichkeiten stärken, die uns in Richtung des Gesundheitspols wandern lassen. Empirisch konnte gezeigt werden, dass Kinder in Naturerfahrungsräumen länger, lieber und weniger allein spielen. Zudem ist das Kinderspiel im Freien komplexer, kreativer und selbstbestimmter, was auch mit Lerneffekten zusammenhängen dürfte.

Allerdings: Erst Freiheit ermöglicht es, sich die Natur wahrhaft anzueignen. Der Naturraum wird als bedeutsam erlebt, in dem man eigene Bedürfnisse erfüllen und eigene Phantasien und Träume schweifen lassen kann. Dabei spielen auch die symbolischen Valenzen von Natur eine Rolle; Natur wirkt gewissermaßen als eine symbolische Projektionsfläche für Selbst- und Weltdeutungen [5]. In dieser Hinsicht kann Naturerfahrung auch sinn- und identitätsstiftend sein. Das besagte Freiheitsmoment bei Naturerfahrungen ist auch beim Draußenlernen zu berücksichtigen.

Das Erleben von Natur verändert übrigens auch die Einstellungen gegenüber der Natur positiv. Allerdings muss mit Blick auf entsprechende Bildungsbemühungen (► „Bildung für nachhaltige Entwicklung“, BNE) bedacht werden, dass es die selbst gewählten, freizügigen Naturerfahrungen sind, die gleichsam beiläufig in Richtung umweltpfleglicher Einstellungen und Handlungsbereitschaften wirken können.

Bereits bei Humboldt wird Bildung verstanden als die „Verknüpfung unseres Ichs mit der Welt zu der allgemeinsten, regsten und freiesten Wechselwirkung“ [6].

Bildung ist nicht im ständigen Kreisen um sich selbst zu haben, sondern hat einen äußeren Gegenstand zur Bedingung, an dem wir uns abarbeiten können. Bei Humboldt ist zudem das Motiv der Freiheit und der Notwendigkeit der Selbstbildung bereits angelegt. Diesen Elementen von Bildung kann bei den regelmäßigen Naturerfahrungen in Draußenschulen sehr gut Raum gegeben werden.

Im Zusammenhang mit dem Ansatz des Erfahrungslernens wird die Krise als Anlass bzw. Herausforderung für Bildungsprozesse verstanden. Bildung ist vor diesem Hintergrund die Transformation „grundlegender Figuren des Welt- und Selbstverhältnisses angesichts der Konfrontation mit neuen Problemlagen“ [7]. Von zentraler Bedeutung für derartige Transformationen ist, dass man dafür Zeit hat. Insofern ist die Entlastung von unmittelbarem Handlungsdruck eine wichtige Bedingung für Bildungsprozesse. In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, dass das griechische Wort für Schule „*scholae*“ in der wörtlichen Bedeutung „Muße“ heißt. Dieses mußevolle, geradezu beiläufige Lernen hat in der Natur beim Draußenlernen besonders gute Chancen.

Draußen bildungsplanorientiert unterrichten – eindrücklich und nachhaltig

Neben den allgemeinen positiven Einflüssen von Natur auf die Lernatmosphäre und die Gesundheit der Lernenden bieten naturnahe Lernorte auch viel Potenzial, um Bildungsinhalte wirkmächtig umzusetzen. Die schulischen Bildungsziele werden in den meisten Bildungsplänen einerseits in zu erreichende Fachkompetenzen und andererseits in personale und soziale Kompetenzen unterteilt. In den einzelnen Fachbereichen werden spezifische Ziele formuliert. In einigen Fächern liegt der Mehrwert von Draußenunterricht auf der Hand. Weshalb sollten in Biologie in Klasse 5/6 beispielsweise beim Thema „Blütenpflanzen“ einzelne Organismen ins Klassenzimmer geholt werden, wenn sie vor der Schultür an ihrem Wuchsort erlebt und untersucht werden können? Und warum sollte man in Klasse 9/10 das Thema „Ökosysteme und Standortfaktoren“ nur mit Buch und Film thematisieren, wenn doch garantiert zumindest eine kleine Grünfläche auch vom innerstädtischen Klassenzimmer aus gut zu erreichen ist? Auch in einigen weiteren Fächern wie Sachunterricht und Geographie liegt Draußenunterricht in vielen Themenbereichen auf der Hand (Abbildung 2). Studien aus Dänemark zeigen jedoch, dass auch in Fächern wie Mathematik und Sprachen durch Draußenunterricht ein Mehrwert erzielt werden kann [1], beispielsweise bei der Errechnung eines Stammvolumens. Besonders wertvoll wird Draußenunterricht, wenn wie nach finnischem Bildungsplan phänomenorientiert und fächerverbindend gelernt wird. Dann kann beispielsweise der Baum ganzheitlich als Phänomen untersucht werden, und anschließend kann differenziert auf ökologische, ökonomische oder soziale Dimensionen und fachliche Perspektiven eingegangen werden.

Ein solches Vorgehen birgt auch großes Potenzial für eine Bildung für nachhaltige Entwicklung, die sich durch Interdisziplinarität, Mehrperspektivität und systemisches bzw. vernetztes Denken auszeichnet. Die Leitperspektive BNE wird in Deutschland in zwölf Teilkompetenzen unterteilt und fokussiert insbesondere auf Gestaltungsfähigkeit und Handlungsfolgenabschätzung mit Bezug zu anderen Räumen und kommenden Zeiten. Vor dem Hintergrund dieser Zielsetzung erscheint Draußenunterricht als Bereicherung des Klassenzimmerunterrichts überaus sinnvoll, denn Gestaltungsmöglichkeiten und Handlungsfolgenabschätzung im lokalen und globalen Maßstab sind im Klassenzimmer sprichwörtlich begrenzt.

Neben fachlichen Kompetenzen kann Draußenunterricht besonders auch soziale und personale Kompetenzen fördern. Durch das Verlassen des Klassenzimmers wird die gewohnte Sitzordnung aufgelöst. Neue Horizonte werden eröffnet, die auch Unsicherheiten und neue Herausforderungen mit sich bringen und zu Wachstum im Bereich der personalen Ressourcen führen können. Im Freien kommt es zudem zwangsläufig zu neuen sozialen Interaktionen, die beispielsweise gute Kommunikation bedingen und sich in vielerlei Hinsicht positiv auf die soziale Kompetenz auswirken können [1].

Draußenlernen an der Laborschule Bielefeld¹

An der Laborschule Bielefeld² wird v. a. im Bereich der Primarstufe, aber auch in höheren Jahrgängen und in der Oberstufe, das Potenzial von Naturerfahrungen für die persönliche und schulische Entwicklung geschätzt und in den Schulalltag eingebunden. Die naturnahe Umgebung der Laborschule bietet viele Möglichkeiten, das Schulgelände zu verlassen und in wenigen Minuten im Park, auf einem naturnahen Spielplatz oder im Teutoburger Wald zu sein. Der neuerdings betriebene Schulgarten am Rand des Teutoburger Waldes bereichert das Angebot. Eine Basis dafür bildet der Grundsatz der Laborschule, so viel Belehrung wie möglich durch Erfahrung zu ersetzen oder durch Erfahrung zu ergänzen [9, 10].

- (1) Bedeutsam sind kontinuierlich über das gesamte Schuljahr hinweg stattfindende Naturbegegnungen, die pädagogisch spezifisch begleitet werden.
- (2) Die Schüler/-innen werden ermutigt, ihre Wahrnehmung zu üben und sinnlich aufzunehmen, was an Eindrücken auf sie einströmt.
- (3) Sie sind eingebunden in den sozialen Kontext einer Gruppe und erleben jeweils für sich und doch miteinander. Dabei lernen sie auch die Unterschiedlichkeit

¹ Dieser Abschnitt ist ein stark gekürzter Exzerpt einer Publikation der Bielefelder Projektgruppe [8].

² An der Bielefelder Laborschule werden seit ca. 50 Jahren in enger Kooperation mit der Universität Bielefeld neue Formen des Lehrens und Lernens erprobt und erforscht. Web: <https://laborschule-bielefeld.de/de/home> und <https://oberstufenkolleg.de/> In enger Kooperation mit der Universität Bielefeld werden in diesem „Labor“ neue Formen des Lehrens und Lernens entwickelt, erprobt und wissenschaftlich befohrt.



ABB. 2 Lebewesen in der Laubstreu – die Abbildungen aus dem Schulbuch werden „lebendig“.

in den Perspektiven und Bedürfnissen der Anderen kennen.

Die Kernidee des Modellprojekts zielt also auf begleitete, regelmäßige und selbstbestimmte Naturaufenthalte während der Schulzeit. Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen empirisch fundierten Wirkungen von Naturerfahrungen werden in dem gerade laufenden Modellprojekt die folgenden Aspekte empirisch untersucht.

Naturerfahrungen fördern Lern- und Bildungsprozesse

Es wird draußen weitgehend auf eine unmittelbare, gezielte Einbindung in fachliche Lernprozesse verzichtet und trotzdem – das sind zumindest die langjährigen Erfahrungen an der Laborschule Bielefeld – profitieren davon die inhaltlichen Lernprozesse von so gut wie allen Schüler/-innen in den verschiedensten Fächern. Dies ist umso bemerkenswerter, als angesichts mehrerer naturpädagogisch betreuter Stunden in der Woche natürlich für das Unterrichten im klassischen Sinne weniger Zeit bleibt. Im Kontext neuerer Ansätze zur Rhythmisierung von Schule wird diese Paradoxie konstruktiv gewendet. Die Kinder bringen von draußen inspiriert oft Fragen und konkrete Inhalte mit in die Schule, die dort systematisch aufgegriffen werden können.



ABB. 3 Eine Schülerin veranschaulicht ihren Mitschülern im Heidelberger Stadtwald die Merkmale von Insekten auf kreative Art und Weise.

Naturerfahrungen haben eine Wirkung auf Wohlbefinden und Gesundheit

Das Konzept ist auch ein Beitrag zur schulischen Gesundheitsförderung. Der generelle Zusammenhang von Naturerfahrung und Wohlbefinden beeinflusst auch andere Aspekte von vor allem seelischer Gesundheit. Diese sind gerade für den Schulbereich von Bedeutung wie z. B. Selbstwertstützung, Selbstwirksamkeit, Vitalität, Bewältigung von Stress oder Stimmungsaufhellung. Zudem gibt es Auswirkungen auf die psychosoziale Entwicklung, Kreativität, Konzentration sowie die Wahrnehmungsfähigkeit.

Naturerfahrungen wirken auf soziale Beziehungen und Kompetenzen

Regelmäßige Naturaufenthalte fördern die Entwicklung von sozialen Kompetenzen. Zudem führt das Eintauchen in eine naturnahe Umgebung zu einem Anstieg prosozialer Orientierungen und im Gegenzug zu einer Abnahme selbstbezogener Bestrebungen. Freiheit und Unkontrolliertheit haben einen wesentlichen Anteil an diesen sozialen Effekten.

Regelmäßige Naturkontakte wirken auf Einstellungen und Handlungsbereitschaften im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung

Naturerfahrungen können eine positive Wirkung auf die Naturverbundenheit und ein nachhaltigkeitsbezogenes Verhalten haben. Dies steht aber bei dem Bielefelder Konzept nicht auf moralisierende Weise im Vordergrund. Denn es sind gerade die selbst gewählten Naturerfahrungen, die gleichsam beiläufig in Richtung umweltpfleglicher Einstellungen und Handlungsbereitschaften wirken können.

Draußenlernen in Heidelberg

Am Gymnasium Englisches Institut in Heidelberg findet im Rahmen des Heidelberger *Outdoor-Education*-Konzepts – ähnlich wie an der Laborschule Bielefeld – Lernen regelmäßig in naturnaher Umgebung statt. Allerdings unterscheiden sich die beiden Ansätze hinsichtlich Umsetzung, Methodik und Zielsetzung.

Raus aus dem Klassenzimmer: Die Umsetzung

Das „Heidelberger *Outdoor-Education*-Konzept“ ist eine Unterrichtsform, die seit zehn Jahren am Gymnasium Englisches Institut in Heidelberg durchgeführt wird. Die vier fünften Klassen dieses Gymnasiums (ca. 27 Schülerinnen und Schüler pro Klasse) lernen einen Vormittag pro Woche das ganze Jahr über außerhalb des Klassenzimmers in der nahen Schulumgebung. Meistens findet der Unterricht in einem naheliegenden Tal in naturnaher Landschaft statt, manchmal aber auch an anderen außerschulischen Lernorten wie Lernlaboren, Museen oder Bauernhöfen³. Jeweils zwei Lehrpersonen begleiten die Klassen in den sechs Schulstunden, die laut Stundenplan die Fächer Biologie, Geographie und Sport umfassen (www.englisches-institut.de/paedagogisches-konzept/outdoor-education).

Wohlgeordnete Freiheit: Die Methodik und die Zielsetzung

Outdoor Education wird in Heidelberg nicht als Methode, sondern als Unterrichtsform verstanden. Der Lernort macht ein spezielles Methodenrepertoire erforderlich. Alle zehn bisher am Projekt beteiligten Lehrpersonen haben die Erfahrung gemacht, dass tradierte Unterrichtsmethoden aus dem Klassenzimmer und insbesondere Frontalunterricht im Freien kaum möglich und sinnvoll sind. Die Freiräume, die naturnahe Lernorte mit sich bringen, müssen methodisch-didaktisch aufgegriffen werden. Idealerweise laufen die *outdoor*-Tage in Heidelberg wie folgt ab:

³ In der Literatur schließen die Begriffe „Draußenlernen“, „Draußenunterricht“ und „Draußenschule“ oft außerschulische Lernorte wie Lernlabore ein. Wir plädieren dafür, dass diese Begriffe zukünftig nur noch für Unterricht im Freien an didaktisch nicht oder nur wenig strukturierten Lernorten verwendet werden.

- Die Lehrperson gibt ein möglichst fächerverbindendes Tagesthema aus dem Bildungsplan vor, zum Beispiel „Boden“.
- Mit möglichst wenig Anleitung entwickeln die Kinder, nachdem sie zuvor die Umgebung erkundet haben, eigene Fragestellungen innerhalb des Themenbereichs.
- Möglichst selbstständig erarbeiten sich die Kinder in kleinen Gruppen Antworten auf ihre Forschungsfrage, zum Beispiel durch kleine Experimente und Informationsmaterialien.
- Am Ende werden alle Ergebnisse und Vorgehensweisen gemeinsam diskutiert und festgehalten (Abbildung 3).

Dieses Konzept weist unter anderem Verbindungen zu Lerntheorien von John Dewey, David Kolb und Kersten Reich auf. Dewey war überzeugt, dass Lernprozesse stets auf konkreten Erlebnissen und deren Reflexion aufbauen sollten. Kolb entwickelte den erfahrungsbasierten Lernzyklus, in dem Erleben, Reflektieren, Konzeptualisieren und Ausprobieren wesentliche Kriterien für erfolgreiche Lernprozesse beschreiben. Der interaktionistische Konstruktivismus nach Reich beschreibt, dass Lernen als Vermittlung auf abstrakter Ebene nicht funktionieren kann. Stattdessen müssen die Lernenden die Möglichkeit erhalten, sich die Welt durch aktive Interaktion selbst zu rekonstruieren (i. w. S. entdecken), zu konstruieren (i. w. S. erfinden) und zu dekonstruieren (i. w. S. kritisieren) [1].

Der Lernort außerhalb des Klassenzimmers fordert alle Beteiligten heraus, neue Rollen und Wege zu finden. Die Lehrpersonen können beispielsweise nicht genau vorhersehen und kontrollieren, welche Lernwege die Kinder einschlagen. Sie nehmen während des Lernprozesses eine passive, beratende Rolle ein und müssen am Ende trotzdem sicherstellen, dass die inhaltsorientierten und prozessorientierten Ziele des Bildungsplans erreicht werden. Die Kinder haben größere Freiheiten als im Klassenzimmer und können vieles selbstständig entdecken. Allerdings steigt dadurch auch die Verantwortung für das eigene Tun und es muss aktiv nach Lern- und Lösungswegen gesucht werden. Lehr-Lern-Prozesse finden mit Rousseaus Worten in „wohlgeordneter Freiheit“ statt.

Wald und Wiese wirken wirklich: Die Begleitforschung

Das Heidelberger *Outdoor-Education*-Konzept stellt den Versuch dar, Naturerfahrungen als regelmäßiges Element im Schulalltag zu verankern. Es wird versucht, die vorgegebenen Bildungsplaninhalte erlebbar zu machen und zugleich die positiven Effekte von Naturaufenthalten auszunutzen. Kann dieser Spagat funktionieren?

Seit 2013 wurde das Heidelberger *Outdoor-Education*-Konzept mehrfach wissenschaftlich begleitet. Die Ergebnisse der Untersuchungen in diesem und weiteren Unterrichtsprojekten weisen darauf hin, dass curriculumentorientierte Unterrichtsformen in naturnaher Schulumgebung tatsächlich zu positiven Effekten in verschiedenen

Bereichen führen können. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass die Lernmotivation insbesondere bei schwach eigenmotivierten Kindern steigt, dass Stress reduziert wird, dass der emotionale Bezug zu den Lerngegenständen wächst und dass die Bewegungsaktivität erhöht wird [2] (Abbildung 4). Ähnliche Ergebnisse konnten weltweit auch in anderen Studien festgestellt werden und durch weitere positive Auswirkungen von regelmäßigem Draußenunterricht ergänzt werden [11].

Fazit und Ausblick

Insgesamt zeigt sich, dass die Draußenschulbewegung in Deutschland Fahrt aufnimmt. Dabei sind die Einflüsse v. a. der skandinavischen Vorbilder unübersehbar: die unterschiedlichen Akzentsetzungen der dänischen *Udeskole* einerseits und des norwegischen Konzepts des *Fritluftsliv* andererseits.

Die *Udeskole* favorisiert subjektorientierte Methoden, ist körper- und bewegungsorientiert, ist aber letztlich am Lehrplan orientiert. Die Aufenthalte in der Natur haben keinen Selbstzweck, sondern dienen schulischen, inhaltsorientierten Lernprozessen. Das Heidelberger Beispiel ist



ABB. 4 In Heidelberg kann beobachtet werden, was die Begleitforschung empirisch fundieren konnte: Draußenunterricht kann unter anderem motivieren, Stress reduzieren und Naturverbundenheit herstellen.

dafür gewissermaßen ein Prototyp. In diesem Beispiel ist es auch kein Zufall, dass sich Fächer wie Biologie, Sport oder Geographie besonders anbieten, denn für die Inhalte dieser Fächer gibt es draußen in der Natur besonderes Anregungspotenzial. Inzwischen zeigen auch in Deutschland zahlreiche Beispiele, dass regelmäßiger Unterricht außerhalb des Klassenzimmers auch in anderen Fachbereichen gewinnbringend sein kann.

Das Konzept des *Friluftsliv* ist dagegen eher eine besondere Weise, in der Welt zu sein. Die damit verbundene Philosophie transportiert bestimmte Welt- und Menschenbilder, die das Mensch-Natur-Verhältnis in besonderer Weise ausdrücken. Inhaltliche Lern- und Bildungsprozesse sind damit zwar nicht ausgeschlossen, ereignen sich aber gewissermaßen nebenbei. Das Bielefelder Konzept ist dafür ein geeignetes Beispiel, wobei davon ausgegangen wird, dass sich die besagten freizügigen Erfahrungen in der Natur inspirierend auf schulische Lern- und Bildungsprozesse auswirken.

GLOSSAR

Attention Restoration Theory: Die zentrale Annahme dieser Theorie ist, dass Naturkontakte u. a. eine Wiederherstellung verbrauchter Aufmerksamkeitskapazität bewirken.

Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE): Teilziel der 17 Globalen Nachhaltigkeitsziele und fächerübergreifende Leitperspektive fast aller Bildungspläne in Deutschland mit dem Ziel, die Zukunft durch Lern- und Bildungsprozesse ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltig zu gestalten.

Biophilie: Eine auf den Evolutionsbiologen E. Wilson zurückgehende Hypothese, nach der die Präferenz für angenehme Naturumgebungen eine anthropologische Konstante ist.

Draußenschule: Umgangssprachlicher Begriff für Schulen, die in ihrem Schulleitbild einen deutlichen Schwerpunkt auf Draußenunterricht legen (z. B. www.draussenschule-ladenburg.de).

Friluftsliv: In der Literatur erstmals Mitte des 19. Jahrhunderts in Norwegen verwendeter Begriff, der die Bedeutung von Natur und Freiheit für das geistige und körperliche Wohlbefinden hervorhebt.

Netzwerk Draußenunterricht: Nicht kommerzielles, von verschiedenen Personen und Institutionen unterstütztes Netzwerk zur Förderung von Draußenunterricht in Deutschland.

Salutogenese: Eine vom Medizinsoziologen A. Antonovsky entwickelte Theorie, die im Gegensatz zum pathogenetischen Modell die Entstehungsbedingungen von Gesundheit fokussiert. Dabei spielt das sog. Kohärenzgefühl eine zentrale Rolle. Es drückt die subjektive Überzeugung aus, dass das Leben verständlich (Verstehbarkeit), beeinflussbar (Handhabbarkeit) und bedeutungsvoll (Sinnhaftigkeit) ist.

Udeskole: Dänisch für „Draußenschule“; regulärer, regelmäßiger, bildungsplanbasierter Schulunterricht außerhalb des Klassenzimmers, der seit der Jahrtausendwende zunehmend intensiv praktiziert und beforscht wird.

Unsere bewusst gewählten, durchaus gegensätzlichen Beispiele zeigen die beiden Pole eines weiten Spektrums von Draußenschulen in Deutschland. Sie bewegen sich gewissermaßen in der Spannung zwischen Bildungsplan und Bildungstheorie. Der oben angedeutete Bildungsbegriff, der Bildung als eine durch Irritationen oder sogar Krisen ausgelöste Transformation von Selbst- und Weltverhältnissen versteht, hat im freien Leben in der Natur (*Friluftsliv*) gute Chancen, realisiert zu werden, wobei allerdings die Bedingungen, die durch Bildungspläne repräsentiert sind, nicht unbeachtet bleiben müssen. Insofern geht es bei der Etablierung von Draußenschulen um die Dialektik von Rahmung und Freiheit, sowohl aus physisch-räumlicher Perspektive als auch aus didaktischer Perspektive. Je nach Kontext muss das passende Maß zwischen Öffnung und Begrenzung, zwischen Inspiration und Entdeckung gefunden werden. Wenn sich im Spannungsfeld zwischen Bildungsplan und Bildungstheorie auch weiterhin viele Schulen für regelmäßigen Draußenunterricht als einen Beitrag zu qualitativ hochwertiger Bildung entscheiden, kann die Draußenschulbewegung in Deutschland mittelfristig ähnlich einflussreich werden wie die *Udeskole*-Bewegung in Dänemark.

Zusammenfassung

Schulunterricht findet in Deutschland an allen Schularten bisher zum allergrößten Teil im Klassenzimmer statt. Dass dies nicht zwangsläufig der Fall sein muss und Unterricht beispielsweise an einem Schultag pro Woche nach draußen verlagert werden kann, zeigt die *Udeskole*-Bewegung in Dänemark. In Deutschland scheint sich im Moment eine ähnliche Draußenschulbewegung zu formieren. Immer mehr Schulen werden im Internet als „Draußenschulen“ verzeichnet. Studienergebnisse zeigen, dass Draußenlernen zu diversen positiven Wirkungen wie zum Beispiel zu einer erhöhten Lernmotivation und zu mehr Bewegungsaktivität führen kann. Das Spektrum der Umsetzung von Draußenlernen an Schulen ist groß und reicht von weitgehend freien Aktivitäten in der Natur wie an der Laborschule Bielefeld bis zu bildungsplanorientierten und fachzentrierten Aktivitäten wie am Gymnasium Englisches Institut Heidelberg. Wenn sich im Spannungsfeld zwischen Bildungsplan und Bildungstheorie auch weiterhin viele Schulen für regelmäßigen Draußenunterricht als einen Beitrag zu qualitativ hochwertiger Bildung entscheiden, kann die Draußenschulbewegung in Deutschland mittelfristig ähnlich einflussreich werden wie die *Udeskole*-Bewegung in Dänemark.

Summary

Outdoor school movement in Germany

So far in Germany, school lessons mainly take place within classrooms at all types of schools. The *Udeskole* movement in Denmark shows that this does not necessarily have to be the case and that lessons can be given outdoors once a week on one school day. In Germany, a similar outdoor ed-

ucation movement seems to develop. More and more schools are listed as outdoor schools on the internet. Study results reveal that outdoor learning can lead to diverse positive effects – e. g. a higher motivation to learn and to more physical activity. The spectrum of realizing outdoor learning is high at schools; it ranges from largely free activities outdoors – as for example at Laboratory School Bielefeld – to activities that are based on educational curricula and are subject-centered as realized at grammar school Englisch Institut Heidelberg. If many schools – caught between specified education plan and education theory – continue to decide for outdoor lessons as a contribution to high-quality education, the outdoor education movement in Germany will be able to become as influential as the Udeskole movement in Denmark.

Schlagworte

Draußenschulbewegung, Draußenunterricht, Deutschland, Dänemark, Laborschule Bielefeld, Heidelberger *Outdoor-Education*-Konzept, *Udeskole*, *Friluftsliv*

Literatur

- [1] J. von Au, R. Jucker (Hrsg.) (2022). *Draußenlernen. Neue Forschungsergebnisse und Praxiseinblicke für eine Bildung für nachhaltige Entwicklung*. Bern, hep-Verlag.
- [2] J. von Au, U. Gade (Hrsg.) (2016). „Raus aus dem Klassenzimmer“. *Outdoor Education als Unterrichtskonzept*. Weinheim und Basel, Beltz.
- [3] K. Barfod et al. (2021). Reaping fruits of labour: Revisiting Education. Outside the Classroom provision in Denmark upon policy and research interventions. *Urban Forestry & Urban Greening* 60, 1–7.
- [4] U. Gebhard (2020). *Kind und Natur. Die Bedeutung der Natur für die psychische Entwicklung*. Wiesbaden, Springer VS (5. Auflage).
- [5] U. Gebhard (2016). *Natur und Landschaft als Symbolisierungsanlass*. In U. Gebhard & T. Kistemann (Hrsg.), *Landschaft – Identität – Gesundheit. Zum Konzept der Therapeutischen Landschaften* (S. 151–168). Wiesbaden, Springer VS.
- [6] W. von Humboldt (1903). *Theorie der Bildung des Menschen*. In *Werke*. Hrsg. von A. Leitzmann. Bd.1. (282–287), Berlin.
- [7] H.-C. Koller (2018). *Bildung anders denken: Eine Einführung in die Theorie transformatorischer Bildungsprozesse*. Stuttgart, Kohlhammer.
- [8] U. Bosse et al. (2020). „Natur in der Schule“. In: U. Hecker, M. Lassek, J. Ramseger (Hrsg.): *Kinder lernen Zukunft: Über die Fächer hinaus: Prinzipien und Perspektiven*. Frankfurt a.M. (Grundschulverband, Band 151), S. 63–89.
- [9] J. Dewey (1916/2011). *Demokratie und Erziehung. Eine Einleitung in die philosophische Pädagogik*, Weinheim, Beltz.
- [10] A. Combe, U. Gebhard (2012). *Verstehen im Unterricht. Die Rolle von Phantasie und Erfahrung*. Wiesbaden, Springer VS.
- [11] R. Jucker, J. von Au (Hrsg.) (2022). *High-Quality Outdoor Learning. Evidence-based Education Outside the Classroom for Children, Teachers and Society*. Berlin, Springer.

Verfasst von:



Dr. Jakob von Au studierte die Fächer Biologie, Geographie und Sport auf Lehramt. Er promovierte im Bereich Outdoor Education in der Abteilung Biologie an der Pädagogischen Hochschule Heidelberg und ist Dozent, Gymnasiallehrer, Lehrerfortbildner und Autor. Zuletzt erschienen von ihm „Draußenlernen – Neue Forschungsergebnisse und Praxiseinblicke für eine Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (2022, hep-Verlag) und „High-Quality Outdoor Learning. Evidence-based Education Outside the Classroom for Children, Teachers and Society“ (2022, Springer).



Prof. Dr. Ulrich Gebhard forscht an der Universität Bielefeld, Fakultät für Erziehungswissenschaft. Er hat Biologie, Germanistik, Erziehungswissenschaften und Psychoanalyse studiert. Seine Forschungsschwerpunkte sind: Psychische Bedeutung von Natur, Natur und Gesundheit, Bioethik, Deutungsmuster von Kindern gegenüber Natur, Sinndimension schulischer Lernprozesse, Intuition und Reflexion (Alltagsphantasien), BNE und Schulentwicklung. 2020 erschien sein Standardwerk „Kind und Natur“ in der 5. Auflage (Springer-VS), außerdem 2021 Gebhard/Lude/Möller/Moormann (Hrsg.): *Natureerfahrung und Bildung* (Springer-VS).

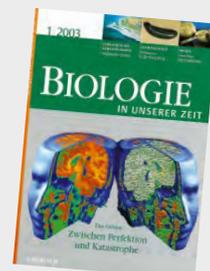
Korrespondenz

Dr. Jakob von Au
Brechtelstraße 27/2
69126 Heidelberg
E-Mail: vonau@ph-heidelberg.de

Prof. Dr. Ulrich Gebhard
Friedenstraße 9
30175 Hannover
E-Mail: ulrich.gebhard@uni-bielefeld.de

BiuZ-JAHRGANG 2003 GESUCHT!

Für das Archiv des VBIO-Bundesverbands suchen wir den Jahrgang 2003 der „Biologie in unserer Zeit“. Wir würden uns freuen, wenn sich jemand von den Ausgaben 2, 3, 4, und 5 trennen könnte. Bitte wenden Sie sich an den VBIO e.V., Corneliusstr. 12, 80469 München, info@vbio.de.



ORNITHOLOGIE

Einsteiger-Wissen



Vögel haben uns Menschen immer schon interessiert. Viele Vögel sind tagaktiv und begegnen uns in allen Lebensräumen. Wir erfreuen uns an den

melodiösen Gesängen, an farbenprächtigen Federkleidern, an bizarrem Balzverhalten und beeindruckende Flug- und Orientierungsleistungen. Neugierig geworden?

Wer als Anfänger tiefer in die Biologie der Vögel eindringen möchte, dem sei das neueste Buch von Hans-Reiner Bergmann empfohlen, der bereits 1987 eine erfolgreiche Einführung in die Biologie des Vogels verfasste. Bergmann ist ein erfahrener und ausgewiesener Ornithologe, den viele als Fachmann für Vogelstimmen und als BiuZ-Autor kennen dürften. Dieses Buch wurde von einem Experten geschrieben, der viele Aspekte der Biologie der Vögel aus eigener Anschauung her kennt. Nach einem sehr kurzen Abstecher in die Evolution der Vögel und ihre Herkunft von den Dinosauriern, werden in den nächsten Kapiteln die Anatomie und Morphologie eines Vogels beschrieben. Ausführlicher werden Federn und das Gefieder sowie der Vogelflug abgehandelt. Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Ernährungsweisen der Vögel erörtert. Danach lernen wir mehr über das außerordentliche Sehvermögen und Gehör der Vögel. Das Riechvermögen ist bei Vögeln deutlich besser ausgeprägt, als man früher annahm. Vögel zeigen hohe kognitive Leistungen mit exzellentem Gedächtnis, Orientierung, ja sogar Verstand und Einsicht. Erwartungsmäßig erörtert Bergmann etwas ausführlicher die Thematik Kommunikation und Vogelgesänge und deren Funktion. Auch der Vo-

gelzug mit der Notwendigkeit der Navigation und Orientierung zählen zu den besonderen Fähigkeiten vieler Vögel. Das Buch endet mit einer kurzen Erörterung der dramatischen Bestandsrückgänge und potenziellen Maßnahmen im Natur und Artenschutz.

Hans-Reiner Bergmann hat mit diesem gut lesbaren und reich bebilderten Sachbuch eine wichtige kurze Einführung in die Vogelkunde vorgelegt, der man weite Verbreitung wünschen kann.

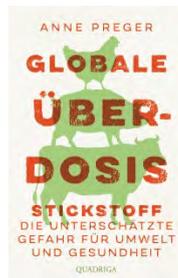
Michael Wink, Heidelberg

Wie funktioniert ein Vogel?

Hans-Reiner Bergmann, Quelle und Meyer, Wiebelsheim, 2022, 152 S., 16,95 Euro, ISBN 978-3-494-01937-6.

UMWELT

Unterschätzte Gefahr



Stickstoff als Mitverursacher der globalen Umweltkrise ist einer der eher unterschätzten und bislang wenig medienpräsenten Faktoren, die jenseits der planetaren Belastungsgrenze liegen. Diesem etwas stiefmütterlichen Dasein macht die Autorin nun ein Ende. Kompetent und wortgewandt hat sie in auch für chemische Laien gut verständlicher Art einen „wissenschaftlichen Roman“ verfasst zu allem, was den Stickstoff interessant und gefährlich macht: chemische Eigenschaften, Wirkungsweisen, (Emissions-)Quellen, Einbindung in Stoffkreisläufe, Möglichkeiten der Gegensteuerung. Dabei dürfen auch leicht ironische Bemerkungen nicht fehlen. Sie lockern den von der Theorie her eher trockenen Lesestoff nicht nur auf, sondern geben auch viele Denkanstöße.

In einer prologähnlichen Einführung bereitet Preger, beginnend mit einem aufrüttelnden Fallbeispiel, den Leser auf das Problem Stickstoff vor. Das macht gespannt auf das, was wohl folgen wird. Die Mischung aus salopp formulierten Unterüberschriften der inhaltlichen Untereinheiten (z. B. „Krieg um Vogelkacke“), populärwissenschaftlichen und harten wissenschaftlichen Fakten – so auch in den Infokästen – ist gelungen, denn die Autorin arbeitet eine große Bandbreite an Faktenwissen auf, basierend auf einer beeindruckenden Quellenutzung (38 S. Verzeichnis). Durch die zum Teil kleinschrittige Gliederung in thematische Einheiten ist stets die inhaltliche Orientierung gegeben.

Die drei Teile des Buches beleuchten die Entwicklung des zunehmenden Stickstoffeintrags, dessen globale Folgen und Lösungsmöglichkeiten. Besonders zeitgemäß mit konstruktiven Handlungsoptionen für jeden von uns ist das Kapitel „Planetenfreundlich leben“, wo es u. a. um fleischlose Ernährung, den Hype um proteinangereichertes *Functional Food* und Lebensmittelverschwendung geht. Den Epilog bildet schließlich der „Glückskele“, dem munteren Schreibstil der Autorin gemäß, mit einem Aufruf zur Zusammenarbeit mit der Natur.

Diese Lektüre braucht keine Langeweilestunden, damit man sie in die Hand nimmt, im Gegenteil: Sie ist ein guter Anlass, um sich mehr (Frei-)Zeit für ein gutes Buch mit geschickt integrierten kleinen Spannungsbögen zu nehmen und sich der (verdrängten?) Gefahr durch globalen Stickstoffanstieg bewusst zu werden. Die Autorin verbreitet keineswegs „Weltuntergangsstimmung“, sondern zeigt machbare Lösungsstrategien auf.

Christiane Högermann, Osnabrück

Globale Überdosis.

Stickstoff – Die unterschätzte Gefahr für Umwelt und Gesundheit. Anne Preger, Bastei-Lübbe, Köln, 2022, 410 S., 22,00 Euro, ISBN 978-3-86995-122-5.

In letzter Zeit etwas Interessantes gelesen? Die BiuZ-Redaktion freut sich über ansprechende Rezensionen von Medien (Bücher, DVDs, Experimentierkästen usw.) rund um die Biologie!

INSEKTEN

Der andere Naturführer



Bücher über Insekten scheinen Saison zu haben – so viele wie in den vergangenen zwei Jahren erschienen sind. Da stellt sich schon die Frage,

ob ein weiteres dieser Werke einen nennenswerten Erkenntnisgewinn verspricht. Die Autoren, Hannelore Hoch, Professorin für Zoologie an der Humboldt-Universität zu Berlin, und Ekkehard Wachmann, Zoologie-Professor an der Freien Universität Berlin, haben ein Frage-und-Antwort-Buch vorgelegt, das tatsächlich völlig ungewöhnliche und selten zugängliche Einblicke ins Insektenleben bietet. Etliche der 222 Fragen, die im Buch gestellt und beantwortet werden, wollte wahrscheinlich kaum jemand „schon immer wissen“. Doch dessen ungeachtet sind sämtliche in diesem wunderbaren Buch angesprochenen Fragen spannend, und die Antworten rundum interessant und befriedigen die Neugier der Leser/-innen.

Die 222 Fragen sind in Gruppen zusammengefasst und betreffen so grundlegende Themen wie Anatomie, Evolution, Diversität, Verbreitung, Sinnesleben, Fortbewegung und Entwicklung der Insekten, aber auch Bereiche der menschlichen Praxis und Gesundheit wie Bionik, Naturschutz und medizinische Entomologie. Viele Fragen verweisen auf ungewöhnliche und wenig bekannte Phänomene wie zum Beispiel „Was haben Insekten in Erdölpfützen zu suchen?“, „Können Insekten elektrische Ladung wahrnehmen?“ oder „Wieso tragen manche Insekten Sprengstoffrucksäcke?“. Andere Fragen werden sich tatsächlich schon einige Leser/-innen gestellt haben, beispielsweise „Wie alt können In-

sekten werden?“, „Wie viele Eier legen Insekten?“, „Warum sterben Hummeln unter Linden?“ oder „Warum kann die Fliege an der Decke laufen?“. Diese und alle anderen Fragen werden dem Stand der Wissenschaft entsprechend in gut verständlicher Sprache beantwortet. „Gut verständlich“ heißt nicht „kindgerecht“ oder „auf Grundschulniveau“. Eine solide Allgemeinbildung wird schon vorausgesetzt, und einige Fremdwörter werden auch als bekannt vorausgesetzt. Entomologische Fachbegriffe werden aber in einem achtseitigen Glossar erklärt. Weiterführende Literatur und einschlägige Internetquellen sind auf weiteren vier Seiten aufgeführt.

Insgesamt stellt dieses Buch eine lohnende Lektüre für alle dar, die sich für die Vielfalt der Erscheinungs- und Lebensformen der Insekten interessieren. Dabei ist es nicht einfach nur ein Buch mehr über die Kerbtiere. Die einzelnen Fragen können ohne weiteres jeweils separat gelesen und verstanden werden. Man kann das Buch aber auch ganz konventionell von Anfang bis Ende lesen – die Kapitel bauen locker aufeinander auf, so dass eine spannende Lektüre gewährleistet ist.

Hervorzuheben sind die zahlreichen exzellenten Fotos, von denen die meisten Ekkehard Wachmann aufgenommen hat. Eine weitere Besonderheit, die ich ausnehmend gut finde, sind die QR-Codes, die bei der Frage „Wie produzieren Insekten akustische Signale?“ neben den Fotos der vorgestellten Beispiellarten zu finden sind. Wenn man sie mit einer üblichen QR-Lese-App scannt und den erkannten Link öffnet, wird man auf die Website des Verlags Quelle & Meyer geleitet und kann die Tonaufnahmen der Signale der abgebildeten Insekten hören. Diese Ergänzung zu Schrift und Bild erhöht nicht nur den Informationsgewinn, sondern fügt dem Lese- noch ein Hörvergnügen hinzu.

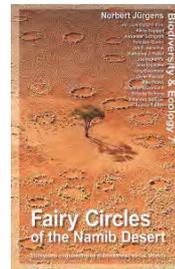
Michael Schmitt, Greifswald

Insekten.

Was Sie schon immer fragen wollten. Hannelore Hoch, Ekkehard Wachmann, Quelle & Meyer, Wiebelsheim, 2022, 348 S., 24,95 Euro, ISBN 978-3-494-01880-5.

NATURPHÄNOMEN

Rätselhafte Oasen



In den Savannen am östlichen Rand der Namib-Wüste blieb ein erstmals 1971 durch Ken Tinlay dokumentiertes Naturphänomen, die Feenkreise, jahrzehntlang

rätselhaft. Dabei handelt es sich um kreisförmige, gelegentlich auch ovale kahle Flecken von 40 bis 50 Metern Durchmesser, die sich deutlich vom umgebenden Grasland abheben. Am äußeren Rand sind sie von einem schmalen Ring relativ hoher, ausdauernder Gräser der Gattung *Stipagrostis* umgrenzt, daher werden sie auch als Feenringe bezeichnet. Während im umgebenden Grasland einjährige *Stipagrostis*-Spezies dominieren, die wenige Wochen nach Ende der Regenzeit vertrocknen, sterben die Gräser am Rand des Feenrings nur ab, wenn der Regen mehrere Jahre ausbleibt. Die Vorkommen der Feenkreise in der östlichen Namib-Wüste korrelieren mit einem durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von etwa 100 mm, geliefert durch periodisch auftretende stärkere Regenfälle. Diesbezüglich unterscheidet sich die östliche Namib von der ausgesprochen trockenen, durch Küstennebel geprägten westlichen Namib. Unter günstigen klimatischen Bedingungen und auf sandigem Boden können Feenkreise als landschaftsprägende Elemente lokal gehäuft – ähnlich einem Wabenmuster – dicht beieinander liegen.

Das vorliegende Werk fasst den aktuellen Wissensstand über die Feenkreise der Namib zusammen. Vieles davon basiert auf mehreren Jahrzehnten systematischer Forschungen im Umfeld des Hauptautors Norbert Jürgens von der Universität Hamburg. Die Autoren diskutieren ausführlich die aktuell favorisierte Hypothese zur Entstehung von Feenkreisen in der Namib: Unterirdisch lebende herbivore Sandtermiten der Gattung *Psammotermes* fressen selektiv im Umkreis des Röhrensystems ihrer Kolonie die Wurzeln von Gräsern, die infolgedessen absterben und einen kahlen Fleck hinterlassen. Da in diesem Bereich die Transpiration der Vegetation entfällt, versickern Regenwasser oder Tau ohne größere Verluste im sandigen Untergrund. Nur in den obersten Bodenschichten gehen kleinere Mengen an Wasser durch rein physikalische Verdunstung verloren. Letztendlich bildet sich dadurch etwa 1 m tief unter dem kahlen Fleck ein langlebiges Wasserreservoir, das die Luftfeuchtigkeit im unterirdischen Termitenbau erhöht und das Wachstum der ausdauernden Gräser an der Peripherie des kahlen Flecks fördert. Somit schaffen sich die Termiten selbst durch den Wurzelfraß ein lebensfreundliches Kleinklima. Vor allem in der nördöstlichen Namib findet sich außerhalb des schmalen Rings der hohen Gräser gelegentlich ein auffälliger Halo mit kleineren ausdauernden Grasbüscheln. Wie dieser mit Wasser versorgt wird, ist noch nicht geklärt.

Die Autoren betonen, dass das vorgestellte Erklärungsmodell nur lokal in der östlichen Namib gültig ist, und schlagen deshalb die Bezeichnung *Feenkreise der Namib* vor. Damit distanzieren sie sich von einer jahrzehntelangen wissenschaftlichen Kontroverse, die sich daran entfachte, dass kahle Flecken in anderen Regionen der Welt auf andere Faktoren zurückgeführt werden, darunter Selbstorganisation der Vegetation infolge von Konkurrenz

(Australien), aus dem Boden austretende Gase (Brasilien) oder die Aktivität von Mikroorganismen wie Pilzen und Bakterien. In diesen Regionen weichen die klimatischen Bedingungen und die Gegebenheiten des Untergrunds klar von denen in der Namib ab. Einem kurzen Rückblick auf alternative, im Zusammenhang mit der Erforschung der Feenkreise der Namib aufgestellte Hypothesen ist ein eigenes Kapitel gewidmet. Die Kontroverse wird am Schluss des Bandes nochmals aufgegriffen, indem eine Reihe anderer Beispiele von kreisförmigem Pflanzenwachstum in der Namib vorgestellt werden, die nicht mit Feenkreisen verwechselt werden dürfen. Als Ursachen für diese Phänomene werden unter anderem klonales Wachstum rund um Mutterpflanzen, Eutrophierung eines Areals durch Kadaver oder die Sammlertätigkeit von Ameisen angeführt.

Dass Feenkreise nur in einem Teil des Verbreitungsgebiets der Sandtermiten auftreten, erklären die Autoren mit dem trockenen Klima der Namib. Während Sandtermiten in feuchteren Regionen Holz verwerten, stehen in den Savannen der östlichen Namib fast ausschließlich Gräser als Nahrungsquelle zur Verfügung. Als besondere Anpassung bevorzugen die Termiten dort offenbar die bei Regen innerhalb der Feenkreise keimenden einjährigen Gräser bzw. deren Wurzeln, so dass zunächst der kahle Fleck abgeweidet wird und der periphere Ring ausdauernder Gräser als Nahrungsreserve für längere Trockenzeiten bleibt.

Nach einer kurzen, auch an interessierte Laien gerichteten Vorstellung des Phänomens vertiefen einzelne Kapitel den Wissensstand zu den als Ökosystem-Ingenieure verantwortlich gemachten Termitengruppen (wobei eine bemerkenswerte konvergente Entwicklung bei Sandtermiten in Namibia und Erntetermiten aus der Gruppe der Hodotermitidae in Angola postuliert wird), zum Lebenszyklus

und Alter der Feenkreise (von der Gründung einer neuen Termitenkolonie über die Ausbildung des kahlen Flecks, den Erwerb des ausdauernden Grasrings nach mehreren Jahren bis hin zur Seneszenz), zur saisonalen Fluktuation durch Regenfälle und Termitenfraß sowie den klimatischen und bodenkundlichen Verhältnissen, die Feenkreise fördern. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf den systematischen Messungen des Wasserhaushalts im Areal der Feenkreise, denn auf diesen Befunden basiert die eingangs vorgestellte Hypothese der Entstehung durch Termitenfraß. Feenkreise beeinflussen nicht nur das Wachstum von Gräsern, Blütenpflanzen und Gehölzen. Ihrer Stellung im Nahrungsnetz und der mit ihnen assoziierten Fauna ist ein eigenes Kapitel gewidmet. Soweit untersucht, werden auch die Vorkommen von Mikroorganismen, Pilzen und Pflanzenpathogenen referiert.

Der in englischer Sprache verfasste Band ist außerordentlich großzügig mit qualitativ hochwertigen, eindrucksvollen Fotos, Grafiken und Kartenmaterial ausgestattet. Bereits früher publizierte Befunde und neue, bislang nicht veröffentlichte Daten werden in wechselnder Reihenfolge vorgestellt, passend zum Thema und roten Faden des jeweiligen Kapitels. Von wenigen Druckfehlern abgesehen wirkt das Werk sorgfältig lektoriert. Der Text ist dank integrierter Begriffserklärungen in weiten Teilen auch ohne Spezialwissen verständlich und kann von Biologen und interessierte Laien gleichermaßen mit Gewinn gelesen werden.

Annette Hille-Rebfeld, Stuttgart

Fairy Circles of the Namib Desert. Ecosystem engineering by subterranean social insects. Biodiversity & Ecology 7. Norbert Jürgens, Klaus Hess Verlag, Göttingen, 2022, 376 S., 40,00 Euro, ISBN 978-3-933177-96-0.

AUSSERSCHULISCHE LERNORTE

Der Zoo Krefeld: BNE-Regionalzentrum, Zooschule und mehr

Der Zoo Krefeld wurde 1938 gegründet. Der 14 ha große Park mit seinem alten Baumbestand ist nicht nur das Zuhause von annähernd 1000 Zootieren, sondern durch seine naturnahe Anlage auch ein Habitat für zahlreiche heimische Wildtiere. Drei Tropenhäuser (Regenwaldhaus, SchmetterlingsDschungel, Vogelhaus) entführen in die Welt der Regenwälder und lassen die Besucher/-innen deren besonderes Klima hautnah erleben. Weitere naturnah gestaltete Gehege (z. B. Pinguinpool, Gorillagarten, Pelikanlagune, Erdmännchenlodge) ermöglichen den Besucher/-innen interessante Verhaltensbeobachtungen. Als moderner, wissenschaftlich geführter Zoo definiert sich der Zoo Krefeld heute als Artenschutz- und Bildungszentrum. So liegen auch seine Schwerpunkte im Artenschutz und der außerschulischen Bildung.

Zoologische Gärten halten und züchten gefährdete Tierarten. Auch der Zoo Krefeld trägt durch Zucht zum Erhalt bedrohter Arten bei. Besondere Erfolge kann er z. B. bei der Nachzucht von Spitzmaulnashörnern (Abbildung 1), Schneeleoparden, Flachlandgorillas und Baumkängurus verzeichnen. Besonders wichtig ist auch die Unterstützung verschiedener Schutzprogramme, die erfolgreich vor Ort in aller Welt, aber auch in Deutschland arbeiten. Gemeinsam sind Zoologische Gärten eine treibende Kraft im Artenschutz und können ihre Besucher/-innen

für das Thema Artenschutz und Biodiversität sensibilisieren. Mehr als 45 Millionen Menschen besuchen die Zoos allein im deutschsprachigen Raum jährlich. Ihnen eröffnen sich interessante Einblicke in biologische und ökologische Zusammenhänge. „Wer Tiere kennt, wird Tiere schützen“ – unter diesem Motto haben es sich die Zoos zum Ziel gesetzt, über direkte Begegnungen mit den Tieren Informationen über und Einsichten in die Lebenswelt der Tiere zu vermitteln. Durch das direkte Erleben der exotischen Tier- und Tropenwelten wird eine positive, emotio-

nale Beziehung zur Natur aufgebaut und so der Grundstein für die Bereitschaft zu einem nachhaltigen, umsichtigen und wertschätzenden Umgang mit ihr gelegt.

Mit Neugier die Umwelt entdecken, erforschen und begreifen

Die individuell buchbaren Bildungsangebote des Krefelder Zoos richten sich an alle Altersgruppen – von Kindergartenkindern ab 4 Jahren bis hin zu Seniorengruppen sowie an Beeinträchtigte. Schüler/-innen können z. B. Angebote der Zooschule und des BNE-Regionalzentrums wahrnehmen. Der außerschulische Lernort Zoo ermöglicht eine anschauliche Vermittlung von (natur-)wissenschaftlichen Aspekten und bietet die Möglichkeit einer intensiveren Auseinandersetzung mit schulischen Lerninhalten. Durch Beobachtung, interaktive Begegnungen, partizipative Elemente, Experimente und Forschungsaufträge erschließen sich Artenkenntnis, das Verständnis von Naturkreisläufen sowie Wissen über ökologische, soziale und globale Zusammenhänge.

In seiner Zooschule bietet der Zoo Krefeld seit 1985 bewährte Bildungsangebote an: Beobachten, Analysieren und Auswerten sowie Kennenlernen von Lebensräumen



ABB. 1 Spitzmaulnashornnachwuchs im Zoo Krefeld. Alle Fotos Zoo Krefeld.

BESUCHERINFORMATIONEN

Öffnungszeiten
März–Okt.: 9–19 Uhr
Nov.–Febr.: 9–17 Uhr

Eintrittspreise Schüler/-innen
4,50 €, bei Buchung eines pädagogischen Programms 3,50 €.

Kontakt Zooschule:
lehrer@zooschulekrefeld.de
02151 / 95 52 21 (Anrufbeantworter)

Kontakt BNE-Regionalzentrum:
zoofuehrungen@zookrefeld.de
02151 / 955213

weitere Informationen unter
www.zookrefeld.de



ABB. 2 Unterricht im BNE-Regionalzentrum im Krefelder Zoo.



ABB. 3 Plastik schadet Meerestieren so wie diesem Humboldtpinguin.



ABB. 4 Tiere erleben im Forscherhaus.

und den in ihnen lebenden Tieren. Thematisiert werden unter anderem die „Lebensräume und ihre Bewohner“, „Pinguine – Lebensweise und Bedrohung“, „Räuber und Beute“, „Der tropische Regenwald“, die „Fortbewegung bei Säugetieren“, die „Ökologische Nische am Beispiel der Afrikasavanne“ oder „Fledertiere, Viren & Co“. Der Unterricht für Schulklassen (von Klasse 2 bis zum Abitur, erfolgt durch ausgebildete Biologie-Lehrkräfte (Abbildung 2), die auch an Schulen unterrichten. Er ist kompetenzorientiert gemäß der Kernlehrpläne NRW.

Seit 2020 ist der Zoo Krefeld mit seiner zoopädagogischen Abteilung zudem eines von landesweit 26 BNE-Regionalzentren in NRW. BNE steht für „Bildung für nachhaltige Entwicklung“. Der Leitgedanke dieses pädagogischen Konzepts ist es, die Zukunft gerecht zu gestalten und dafür die notwendigen Kompetenzen zu erwerben. Eine Region darf nicht auf Kosten einer anderen leben. Die UN hat im Rahmen der Agenda 2030 17 „Ziele für eine nachhaltige Entwicklung“ beschlossen (*Sustainable Development Goals* (SDGs), Weltentwicklungsziele). Jedes Land, jede Region, alle Menschen der Welt werden aufgefordert, diese mit Leben und eigenen Ideen zu füllen und so die Welt heute und in Zukunft gerechter und lebenswerter zu gestalten. Ökologische Ziele, soziale Gerechtigkeit und wirtschaftlicher Fortschritt sollen zusammengedacht und so entwickelt werden, dass auch nachfolgende Generationen noch eine lebenswerte Zukunft vorfinden. Der Grundsatz lautet: „Niemanden zurück lassen“. Bildung gilt als Schlüsselement, um diese Ziele zu erreichen.

Der Zoo Krefeld fördert die Verbreitung dieses gesellschaftspolitischen Konzepts der nachhaltigen Entwicklung durch Bildung und trägt die Kerngedanken in die Bevölkerung und in Kitas und Schulen. Die Bildungsangebote orientieren sich an der BNE-Leitlinie NRW, die

auch auf die Kernlehrpläne abgestimmt ist.

Mein Handeln hat Auswirkungen!

Alles, was wir tun, wirkt sich auf andere Menschen und auf die Natur aus. So beeinflusst jeder Einzelne seine Umwelt und gestaltet sie mit – im negativen, aber genauso auch im positiven Sinne, global und regional. Wir sind ein Teil der Natur! Die Teilnehmenden sollen neugierig gemacht und angeregt werden, sich Gedanken über den Umgang miteinander, mit unserer Umwelt und den von uns benötigten Ressourcen zu machen. Aktuelle Probleme wie Klimawandel und der Verlust der Artenvielfalt werden aus unterschiedlichen Perspektiven beleuchtet. Jeder soll so dazu befähigt werden, sich seine eigene Meinung zu bilden und entsprechend zu handeln. Fragen, was unser Plastikkonsum mit der Bedrohung der Meerestiere zu tun hat und welche wichtige Rolle Insekten für uns spielen, werden diskutiert, und es wird überlegt, was der Regenwald mit unserem Alltag und Konsum zu tun hat (Palmöl, Handys u. a.). Immer stehen dabei die Zootiere im Mittelpunkt – je nach Schwerpunktthema können das Pinguine (Abbildung 3), Gorillas, Spitzmaulnashörner oder andere Arten sein.

Schule der Zukunft

Als BNE-Regionalzentrum ist der Zoo Krefeld gleichzeitig auch Teil des Landesprogramms „Schule der Zukunft – Bildung für Nachhaltigkeit“ des Umweltministeriums und des Schulministeriums in NRW. Mitarbeiter/-innen des Regionalzentrums begleiten als *Netzwerkpartner/-innen* die Schulen und leisten Hilfestellung beim Entwickeln und Durchführen neuer Ideen. Durch die Teilnahme am Landesprogramm werden Schulen motiviert, BNE verstärkt im Unterricht zu thematisieren, im Alltag umzusetzen und ihre Schüler/-innen dafür zu sensibilisieren.

Weitere Angebote

Zooführungen ergänzen die oben genannten Angebote. Im Rahmen kostenpflichtiger Führungen werden verschiedenste Themen erlebnisorientiert – z. B. in Quiz- oder Spielform – präsentiert. Auch für Schulgruppen sind die Führungen geeignet. Zudem bietet das Forscherhaus eine Gelegenheit für alle Zoobesucher/-innen, im Rahmen ihres

Zoobesuchs spontan und ohne Anmeldung Natur zu entdecken und zu erforschen (Abbildung 4). Hautnahe tierische Begegnungen mit exotischen Heimtieren und Erkundungen im naturnahen Garten sollen für die Natur und ihre Bedürfnisse sensibilisieren. Ausgestattet mit einer Mikroskopierecke bietet das Forscherhaus spannende Einblicke in Miniaturwelten. Fachkundige Mitarbeiter/-innen

beantworten gerne die Fragen der Besucher/-innen. Spezielle Kurse und Aktionen für geistig oder körperlich beeinträchtigte Personen können selbstverständlich in allen genannten Bereichen durchgeführt werden. Sie werden jeweils mit den nachfragenden Personen oder Organisationen individuell abgesprochen.

Dipl.-Biol. Gaby Borg, Zoo Krefeld



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

Berufsfelder Biologie – hier gibt es den Überblick

Der VBIO hat achtzig spannende Porträts von Biowissenschaftlerinnen und Biowissenschaftlern im Beruf zusammengestellt. Berufsfeldübersichten, Kontaktadressen, Tipps und Internet-Links ergänzen die „Perspektiven“.

Perspektiven – Berufsbilder von und für Biologen und Biowissenschaftler

- Herausgegeben vom VBIO
- 10. überarbeitete Auflage, DIN A5, 256 Seiten, ISBN 978-3-9810923-3-2
- 14,00 Euro (inkl. Versand), 12,00 Euro (VBIO-Mitglieder),
- Direktbestellung über info@vbio.de



www.vbio.de

PERSPEKTIVEN BERUFSFELD BIOLOGIE



MIKROBEN VERSTEHEN

Mikroben leben in einer anderen Welt – Diffusion

In der Welt der Mikroben ist manches anders als in unserem Erfahrungsbereich. Dies äußert sich auch im Verhältnis zur Diffusion von kleinen und großen Molekülen außerhalb und innerhalb mikrobieller Zellen. Während die Eigenschaften der Diffusion im freien Wasser seit langem gut bekannt sind, hat man erst seit kurzer Zeit Zugang zur Dynamik von Molekülen im Cytoplasma lebender Mikroben. Die Theorie der Brownschen Molekularbewegung führt auch hier Regie, aber mit Modifikationen im Detail.

Diffusion extrazellulär

Diffusion hatte für Mikrobenzellen, die meist nur wenige Mikrometer (0,5 bis 5 μm) groß werden, von Beginn ihrer Entstehung und Entwicklung an eine evolutionär nachhaltige Bedeutung. Denn die Mikroben mussten Fähigkeiten ausbilden, mit denen sie im Wasser gelöste und frei diffundierende Nährstoffe nicht nur erkennen und aufnehmen, sondern gegebenenfalls auch verfolgen können. Für die qualitative Wahrnehmung und den Transport in die Zelle ist die Bindung an spezifische Proteine notwendig – und dies schon seit Beginn der Zellentstehung. Das Auffinden von Nährstoff- oder Schreckstoffquellen erfordert zusätzlich die Informationsverarbeitung der quantitativen Diffusionsverhältnisse, und diese Fähigkeit erwarben bewegliche

Zellen später hinzu. Die Details der Detektion von Nährstoffgradienten sind gut untersucht, und es ist seit langem klar, dass Mikroben wegen ihrer geringen Größe nicht in der Lage sind, Konzentrationsunterschiede über ihre geringe Körperlänge unmittelbar festzustellen. Sie testen den räumlichen Gradienten eines Stoffes stattdessen über größere Distanzen durch einen faszinierenden biochemischen Mechanismus, während sie sich im Medium bewegen [1]. Auch die im Wasser gelösten Stoffe bleiben nicht stationär und ihr Diffusionsverhalten ist bereits seit langem theoretisch verstanden.

Die mittlere Zeit t , die ein gelöstes Molekül benötigt, um durch die Brownsche Bewegung eine gewisse Distanz zurückzulegen, hängt von der absoluten Temperatur T , der

Viskosität η des Mediums, der Größe des Moleküls (Radius r) und der physikalischen Konstanten ab, die den charakteristischen Wert der Diffusionskonstante D eines Stoffes bestimmen. Der mittlere Weg x beträgt im Wasser etwa

$$x^2 = 2Dt \text{ mit } D \sim T/(\eta r) \text{ [2].}$$

D hat für typische Nährstoffmoleküle (Zucker, Aminosäuren) Werte zwischen 400 und 1000 $\mu\text{m}^2/\text{s}$ [3]. Die Moleküle legen auf ihrem Zickzackkurs (*random walk*) in einer Sekunde (s) im Mittel demnach 30 bis 45 μm in einer Richtung zurück – eine Strecke, die viele Bakterien etwa in gleicher Zeit durchschwimmen, wie *E. coli* mit durchschnittlich 30 $\mu\text{m}/\text{s}$ [4]. Auf kürzeren Distanzen sind diffundierende Moleküle aber überlegen. So benötigt *E. coli* für 3 μm 0,1 s, Glucose ($D = 670 \mu\text{m}^2/\text{s}$) aber nur etwa 0,007 s und hat nach 0,1 s schon fast 12 μm zurückgelegt. Mikroben (wie alle Einzelzellen) eignen sich auch aus diesem Grund nicht als Jäger individueller Moleküle; sie sind Zufallssammler.

Diffusion intrazellulär

Diffusion birgt einen zweiten Aspekt für Mikroben, der weitaus weniger erforscht ist, nämlich die Dynamik gelöster Makromoleküle im Zellinneren. Es war lange methodisch unmöglich, den Diffusionsweg von Molekülen in intakten Zellen zu verfolgen. Dies gelang erst mit speziellen Verfahren der Fluoreszenzmikroskopie, die empfindlich und schnell genug sind, um einzelne, fluoreszenzmarkierte Makromoleküle zu detektieren. Viele Studien wurden mit der Art *E. coli* durchgeführt, die wie andere Prokaryoten eine hohe Makromoleküldichte (300 mg/ml [5]) und damit eine hohe intrazelluläre Viskosität aufweist. Die Diffusion in Zellen sollte sich also schwerfälliger als in reinem Wasser verhalten und zusätzlich durch intrazelluläre Strukturen und Wechselwirkungen beeinflusst wer-

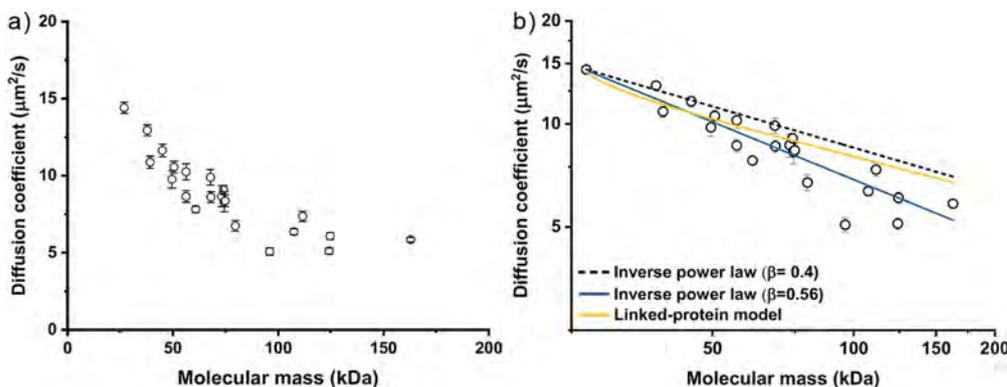


ABB. 1 Diffusionskoeffizienten (D) von fluoreszierenden Testproteinen im Cytoplasma von *E. coli* nach Korrektur für begrenzte Diffusionsräume. (a) D in Abhängigkeit der relativen Molekularmasse (M_r) der Proteine, (b) Anpassung des Exponenten β aus der Beziehung $M_r^\beta \sim r$, mit r = Proteinradius. Abbildungen entnommen aus [6] gemäß Creative Commons Attribution License.

den. Dies äußert sich in kleineren Diffusionskonstanten [4] und in einer phänomenologischen Abweichung von der idealen Diffusionsgleichung, die man als *subdiffusiv* bezeichnet:

$$x^2 \sim t^\alpha \text{ mit } \alpha < 1 \quad [6].$$

Hier steigt das Quadrat der mittleren Diffusionsstrecke nicht mehr linear mit der Zeit an, sondern um einen nichtlinear verlaufenden, kleineren Wert t^α . Der sogenannte anomale Diffusionsexponent (oder Subdiffusionsexponent) α ist eine empirische Größe, die umso kleiner ausfällt, je stärker sich irgendwelche Interaktionen des diffundierenden Makromoleküls mit Zellkomponenten auswirken. Üblicherweise nimmt man dafür reversible Bindungs- und Kollisionseinflüsse an, letztere vor allem mit Cytoskelettstrukturen, die aber in Mikroben einen eher geringen Effekt zeigen [7]. Neuere Untersuchungen lassen darauf schließen, dass die intrazelluläre Diffusion kleinerer und mittlerer Proteine annähernd der klassischen Theorie Brownscher Bewegung folgt und α nahe bei 1 liegt. Denn ein Teil des anomalen Verhaltens lässt sich damit erklären, dass die Diffusion in einem begrenzten Raum (Zelle) stattfindet, was in der Theorie berücksichtigt werden kann [6]. Bindungsphänomene sind also von geringerem Einfluss, hängen aber vom untersuchten Makromolekül ab, etwa im Falle von mRNA und Transkriptionsfaktoren oder bei sehr großen Proteinkomplexen [4, 6]. Die ermittelten Diffusionskonstanten D für kleinere Proteine fallen dadurch allgemein etwas größer aus als vorher ermittelt, sind aber weiterhin von der relativen Molekülmasse (M_r) abhängig (Abbildung 1a). In D geht der inverse Molekülradius ein, der bei globulären Proteinen zu $M_r^{1/3}$ proportional ist.

Allerdings sind Proteine und Proteinkomplexe selten ideal kugelig, sondern unterschiedlich elongiert, so dass der Exponent größer als $1/3$ ausfällt, je nach Proteinform streut und D entsprechend verringert. Verschiedene Messungen bestätigen, dass Exponenten zwischen 0,35 und 2 auftreten (Abbildung 1b, [6]). Sehr große Proteinkomplexe (Ribosomen, Chaperone, intrazelluläre Proteasen) weisen sehr kleine (apparente) Werte für D auf und benötigen einige Sekunden bis Minuten, um eine Mikrobenezelle zu durchwandern. Nun kommen diese Moleküle nicht in Einzahl vor, und die Erreichbarkeit im Cytoplasma hängt nicht vom maximalen Diffusionsweg ab. Die Verteilung dieser großen im Cytoplasma diffundierenden Proteinspezies kann aber von einer homogenen Ausbreitung erheblich abweichen. Weitere Parameter, die D beeinflussen, sind Temperatur (thermophile Mikroben!), Osmolarität (Halophile!) sowie künstliche Behandlungen, die sich auf den Zustand des Cytoplasmas und damit auf dessen Viskosität auswirken. Ein besonderer Effekt tritt in wachsenden, also stoffwechselaktiven Zellen auf. Hier erhöht sich die Mobilität von Proteinen, was sich zumindest zum Teil auf eine aktive Proteinsynthese zurückführen lässt, damit aber nicht vollständig erklärt werden kann [6].

Diffusion extrem

Die Charakteristika der Diffusion von Proteinen in Bakterien wie *E. coli*, *Bacillus subtilis* und ähnlichen Zellen beginnt man nun eher im Detail zu verstehen [6]. Allerdings ergeben sich für zwei extreme Größenaspekte in Mikroben besondere Szenarien. Erstens: Was bedeutet die hohe Makromoleküldichte von 300 mg/ml für sehr große Proteinkomplexe, wenn die Masse der Makromoleküle bereits 25 bis 30 Prozent des Zell-

volumens einnimmt und ein Platzproblem schafft? Das Phänomen des *macromolecular crowding* hat über den Einfluss auf die Diffusion hinaus weitere Auswirkungen, die es gesondert zu betrachten lohnt. Und zweitens: Wie lösen außergewöhnlich große einzellige und bewegliche Mikroben von mehreren 100 μm Länge und bis zu 80 μm Dicke (*Epulopiscium* [8]) das Problem der Diffusionswege und -zeiten und insbesondere der Signaltransduktion zwischen Sensormolekülen und möglicherweise weiter entfernten Empfängerstrukturen? Und könnten die Giganten unter den Mikroben über ihre Zelllänge hinweg nicht auch externe Molekülgradienten direkt abgreifen (siehe oben)? Diese und ähnliche Fragen warten noch auf vermutlich spannende Antworten, denn man kennt den inneren Aufbau solcher Riesenzellen bislang kaum. *E. coli* ist nach wie vor ein wertvoller Modellorganismus für die Mikrobiologie, aber letztere hat noch mehr zu bieten, zu entdecken und zu erklären.

Literatur

- [1] A. Briegel (2022) Biologie in unserer Zeit 52, 72–79, <https://doi.org/10.11576/biuz-5088>
- [2] R. K. Hobbie (1978) Intermediate Physics for Medicine and Biology, J. Wiley & Sons, New York.
- [3] R. C. Weast (1979) CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Boca Raton, Florida, 60th edition, table F-62.
- [4] R. Milo et al. (2016) Cell Biology by the Numbers. Garland Science, New York.
- [5] R. Phillips et al. (2013) Physical Biology of the Cell. Garland Science, London & New York, 2nd edition, p. 31.
- [6] N. Bellotto et al. (2022) eLife 11, <https://doi.org/10.7554/eLife.82654>
- [7] I. Golding, E.C. Cox (2006) Phys. Rev. Lett. 96, 098102.
- [8] H. Engelhardt (2021) Biologie in unserer Zeit 51, 387–388, <https://doi.org/10.11576/biuz-4877>

Harald Engelhardt, Martinsried

PARTNER DES MENSCHEN

Das Hausrind: Eiweißlieferant und Zugtier

Rinder werden in allen Erdteilen von Menschen gehalten und geschätzt: Sie geben vor allem Milch, Fleisch und Leder oder dienen als Zugtier oder sogar als Symbol für Aufschwung und Reichtum. In manchen Kulturen werden sie so verehrt, dass eine Schlachtung eigentlich nicht in Frage kommt. In vielen Ländern überwiegt jedoch die Massentierhaltung. Mittlerweile wird die Rinderproduktion allerdings differenzierter gesehen, da Klimawandel und Tierwohl ein Umdenken erfordern.

Die Wirtschaftskraft der Rinderproduktion ist beeindruckend und erschreckend zugleich: Geschätzte 1,5 Milliarden Rinder leben auf der Erde, die meisten in den USA, Brasilien, China und Argentinien. Zusammen bringen die Hornträger mehr Biomasse auf als alle sieben Milliar-

den Menschen. Und allein für die 12 Millionen Rinder in Deutschland werden knapp 60 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche für den Anbau von Futterpflanzen gebraucht. Der *World Wildlife Fund for Nature* (WWF) betont allerdings, dass es von der Haltungsart abhängt, ob Rinder mit dem Menschen um Anbauflächen konkurrieren, oder ob die Nutztiere sogar als ökologisch wertvoll gelten können.

Das europäische Hausrind (*Bos taurus*, Abbildung 1a) unterscheidet sich phänotypisch und genetisch vom asiatischen Zebu (*Bos indicus*). Die europäischen Hornträger stammen ursprünglich vom europäischen Auerochsen (*Bos primigenius*, Abbildung 1b) ab, dessen Stiere ein Gewicht von 800 bis 1000 kg besaßen. Heutige Hausrinder sind meist etwas kurzbeiniger, die Stiere bringen es aber je nach Rasse auf 1000 bis 1200 kg. Die namensgebenden Hörner (althochdeutsch „rint“ = Horntier) dienen der Abwehr von Raubtieren wie Wolf oder Löwe und stellen noch heute ein Symbol von Macht und Stärke dar. Die ansonsten friedlichen Pflanzenfresser ernähren sich natürlicherweise überwiegend von Gras, das in einem aufwändig gekammerten Magen vergoren wird. Das typische Wiederkäuen sorgt für eine mehrfache Zerkleinerung der faserigen Pflanzenkost, die im Pansen (der größten Magenkammer) durch symbiotische Ciliaten enzymatisch aufgeschlossen wird. Große Mengen Wasser – bis zu 180 Liter an

heißen Tagen – sind für die Verdauung unabdinglich. Rinder leben meist in Herden und können über 20 Jahre alt werden.

Weltweit sind etwa 450 Rassen bekannt, die je nach Zuchtziel in Milch- oder Fleischvieh eingeteilt werden. Die am häufigsten gehaltenen Rinder gehören allerdings nur wenigen Hochleistungsrassen an wie die in Europa typischen Schwarzbunten oder das Braun- und Fleckvieh für die Milchproduktion sowie beispielsweise Hereford, Charolais oder Angus für die Fleischproduktion. Genetisch besonders interessant sind dagegen z. B. die Busa-Rinder der Balkanhalbinsel, die seit Jahrtausenden scheinbar keine Einkreuzungen mehr erlebt haben und deshalb als ursprünglich gelten können. Auch auf anderen Kontinenten gibt es beliebte und seltene Rassen, die für die Züchtungsforschung interessant bleiben. Gerade in Asien gibt es weitere Rinderarten, die aber von anderen Wildformen (z. B. Banteng, Gaur, Wildyak) abstammen.

Steinzeitlicher Begleiter und Bodenbearbeiter

In frühzeitlichen Höhlenmalereien (z. B. Lascaux) finden sich Darstellungen der mächtigen Auerochsen, die als Wildform der heutigen Hausrinder gelten. Mit den nach vorne gerichteten Hörnern, einer Schulterhöhe bis 180 cm und der ansteigenden, muskulösen Schulter-Hals-Linie waren die Bewohner der ehemals eiszeitlichen Prärien beeindruckende Kraftpakete. Die Domestikation hat genetischen Untersuchungen zufolge an mehreren Orten stattgefunden. Die asiatischen Zebus oder Buckelrinder stammen von der asiatischen Form des Auerochsen ab, während die europäischen Auerochsen ursprünglich im Nahen Osten und Anatolien vom Menschen gezähmt wurden, wo die Wildrinder natürlicherweise vorkamen. Schon vor etwa zehntausend Jahren gelangten Menschen und Rinder auf das vorher „rinderfreie“ Zypern. Spätestens vor achttausend Jahren aber



ABB. 1 a) Modernes Braunvieh auf der Alm, b) Rekonstruktion des europäischen Auerochsen.

Fotos: a) www.wikipedia.de, b) Jaap Rouwenhorst.



ABB. 2 Der Minotaurus aus der griechischen Mythologie. Gemälde von George F. Watts um 1885.



ABB. 3 Automatisierung in der Tierhaltung: Eine Kuh lässt sich am Melkroboter die Milch absaugen. Foto: www.landwirtschaftskammer.de.

züchteten sesshafte Ackerbauern im „Fruchtbaren Halbmond“ (Naher Osten) Rinder. Als Zugtier vor einem Pflug konnten sie den Ackerbau verbessern.

Es ist vor allem die schiere Kraft der Pflanzenfresser, die sich in den Mythen und der Kultur der Menschen verewigt hat. Schon der Minotaurus (Abbildung 2) war ein furchteinflößendes Mischwesen – halb Mensch, halb Stier – der in einem Labyrinth auf Kreta gefangen war und niemanden ungeschoren davonkommen ließ, der im Kampf gegen ihn antrat. In Spanien wurde der Stierkampf zu einem großen Showereignis, und noch heute steht der Stier für Börsianer für kraftvolle wirtschaftliche Entwicklung (im Gegensatz zum trägen Bären).

Vom Hochleistungs- zum Ökorind

Durch jahrtausendelange Züchtung veränderte sich das Wildrind. Die Beine wurden kürzer, der Rücken länger und gerader, der Euter größer und haarlos und die Hörner kleiner. Das Hausrind wurde zunehmend zur Milch- und Fleischfabrik. So liegt der Milchertrag bei einer Schwarzbunten Kuh bei etwa 10.000 Liter pro Jahr, wobei diese Milchleistung nur durch Zufütterung von Kraftfutter in Stallhaltung erzielt werden kann. Eine weitere Effizienzsteigerung kann durch Melkroboter (Abbildung 3) erzielt werden. Diese nehmen dem Landwirt einerseits das ermüdende Melken ab, zum anderen muss die Kuh nicht mehr mit prallem Euter auf das erlösende Melken warten, sondern sie kann sich in modernen Betrieben bei Bedarf selbstständig zum Melkroboter begeben. Kühe, die das System kennen, stehen sogar geduldig in der Schlange, bis sie an der Reihe sind. Die Massentierhaltung sorgt zwar für niedrige Kosten, aber Tierwohl und Umwelt leiden darunter. Daher erfahren immer mehr Landwirte Zuspruch, die ihre Rinder überwiegend auf der Weide halten, so dass diese sich frei bewegen können und ohne Kraftfutter auskommen.

Unter diesen Bedingungen sei die Rinderhaltung auch ökologisch wertvoll, erklärt man beim WWF. Sofern für die Weidehaltung keine Wälder gerodet werden, habe die Rinderhaltung mehrere Vorteile. Da Gras nicht Teil des menschlichen Speiseplans sei, bestehe keine Konkurrenz um Nahrungsmittel. Im Gegenteil: Es würden zusätzlich hochwertige Lebensmittel für den Menschen erzeugt. Außerdem würden für die Fütterung der „Ökorinder“ keine Düngemittel oder Pestizide zum Einsatz kommen müssen. Natürlich könne diese Entwicklung nur durch einen Rückgang im Konsum von Rindfleisch getragen werden.

„DAS GEHT AUF KEINE KUHHAUT“

Es begab sich zu einer Zeit, als es noch kein Papier gab und man mit einem Gänsefederkiel auf Pergament schrieb, welches aus Tierhäuten gefertigt wurde. Auch der Dienststellenleiter der Hölle, Lucifer, verfügte über dieses Medium und ließ die Sünden jedes Menschen notieren – jedenfalls war das die damalige Überzeugung der Menschen. Wenn man der Meinung war, dass ein Missetäter es mit seinem Fehlverhalten übertrieb, wurden die größten Pergamente – Kuhhäute – bemüht: Aufgrund von Platzmangel seien weitere Sünden nicht mehr hinnehmbar.

Rückkehr des Auerochsen?

Tierwohl und Haltungsbedingungen sollen auch mithilfe der Gentechnik verbessert werden. Da die Hörner in der Massentierhaltung die Verletzungsgefahr erhöhen, werden die Kälber meist frühzeitig enthornt. Dank der Gentechnik kommen inzwischen Jungtiere auf die Welt, die gar keine Hornanlagen besitzen. Aber die Züchtungsforschung beschreitet noch andere Wege. Obwohl der letzte Auerochse 1627 in Polen gestorben ist, möchte man den Phänotyp dieses Wildrindes durch Kreuzung verschiedener Arten wiederbeleben. Das Heckrind (Abbildung 4) stellt so einen Versuch dar. Offensichtlich wird sich die Beziehung von Mensch und Hausrind weiterentwickeln.

*Pascal Eitner, Maisach,
pascal-eitner@arcor.de*



ABB. 4 Das Heckrind erinnert teilweise an den Auerochsen. Foto: www.wikipedia.de.



MANAGEMENT-FALLSTRICKE, TEIL 16

Clustering-Illusion

Fehlentscheidungen sind menschlich. Wir aber lassen in unserer Serie „Management-Fallstricke“ Tiere zu Wort kommen. In Form von Fabeln vermittelt unsere Autorin Andrea Hauk in anschaulicher Weise typische Denkfehler, die auf allen Managementebenen zu Hause sind. Vielleicht sind Sie ja selbst auch schon einmal in die eine oder andere Falle getappt?

Beim morgentlichen Körnerimbiss geschah es. Langsam schob er das Getreide in seinen Backen von rechts nach links und hypnotisierte dabei den Futtertrog. Seit dem vorigen Abend ging ihm ein Gedanke nicht mehr aus dem Kopf: seine Geschäftsidee. Er selbst fand seine Idee ein Pferdeäpfelbusiness aufzuziehen brilliant. Aber ob sich damit Geld verdienen ließe? Kauend ratterte sein Gehirn. Doch dann erschauerte Hengst Heribert und starrte wie versteinert auf die verbliebenen Körner in seinem Trog, die sich zu einem bizarren Muster arrangiert hatten. Wenn man genau hinsah, entdeckte man das aus den Körnern

geformte Gesicht: Bill Gates. Hengst Heribert verschluckte sich fast am Körnerbrei in seinem Mund. Wenn das kein Zeichen war! Ein Milliardär in seinem Körnertrog! Es fiel ihm nun wie Schuppen von den Augen: Superreiche wurden natürlich reich, weil sie besonders gute Ideen hatten. Und sicherlich hätte zu denen auch jeder am Anfang gesagt: „Das wird nix!“ So wie Kuh Kerstin gestern, die einfach nicht verstanden hatte, dass seine Idee brilliant war. Aus Mist Gold machen. Wie Rumpelstilzchen, nur besser. Und jetzt ein Superreicher in seinem Trog! Das sagte ja schon alles. Seine eigene Geschäftsidee würde genauso gut funktionieren. Außerdem gab es ja noch mehr Beispiele. Man musste sich ja nur Leute wie Mark Zuckerberg, Jeff Bezos oder Elon Musk anschauen. Ob die Ideen nun Facebook, Amazon oder Tesla hießen. Sie alle wurden durch brillante Ideen reich. Warum nicht auch er selbst! Welch Ironie, dass erst Bill Gates in seinem Trog auftauchen musste, damit er das kapierte.

Sofort machte sich Hengst Heribert an die Aufstellung seines Business-Case. Wie von Zauberhand schienen alle Daten seine Idee zu untermauern. Die Welt schien sich nach seinem Pferdeäpfelbusiness schon lange gesehnt zu haben. Außerdem wäre er prima skalierbar. Wie viele Pferde es doch gab auf der Welt! Er plante die Äpfel in Dosen zu verpacken und mittels Online-

Shop in die ganze Welt zu versenden. Nicht nur Hobbygärtner würden ihm seine Produkte aus den Händen reißen. Er könnte verschiedene Produktlinien anbieten. Pferdeäpfel für den Gärtner, Löwenäpfel als Marderschreck, Kuhgülle als Dünger. Der Graph zeigte steil nach oben, doch das wäre ihm auch ohne seine Berechnungen klar gewesen. Es war einfach glasklar, dass seine Idee zum Erfolg führen musste, da alle Anzeichen dafür standen.

„Welche Anzeichen stehen denn nicht dafür?“, muhte die Kuh Kerstin mitten in seine Überlegungen. Hengst Heribert zeigte ihr seinen Schweif und wendete sich wieder seinen Grafiken zu. „Das ist ein No-Brainer“, erklärte Hengst Heribert. „Nichts für fleckiges Weidevieh. Ökolandwirtschaft ist groß im Kommen. Die Welt wird mir mein Produkt aus den Händen reißen.“ „Gibt es aber nicht viel mehr gute Ideen als es Millionäre gibt?“, ließ sich die Kuh nicht von ihrer Kritik abbringen. „Alles Ausreißer“, argumentierte Hengst Heribert. Dann trabte er einen kleinen Kreis und stellte sich auf seine Hinterbeine. Mit seinen Hufen zeigte er gen Himmel. „Schau mal dort“, wieherte er der Kuh zu und deutete etwas nach rechts. „Selbst der Himmel schickt mir Signale.“ Die kleine Wolke am Himmel sah tatsächlich ein wenig aus wie ein verwackeltes Dollarzeichen. Die Kuh nickte und muhte zustimmend. Heribert hatte sie überzeugt. Gemeinsam zogen sie los, um ihren neuen Geldspeicher zu bauen. Den würden sie schließlich brauchen!

**Und die Moral von der Geschicht':
Verlass dich auf herbeigesehnte
Muster nicht.**

*Ihre Andrea Hauk,
andreabauk@gmx.de*

FAKTENBOX

UIUIUUUUUUUI – Nehmen Sie sich zwei Minuten, um die Logik hinter dieser Sequenz zu finden und führen Sie sie fort. Sie haben das Muster gefunden? Gratulation. Sie sind gerade der Clustering-Illusion zum Opfer gefallen. Wir alle fallen viel öfter dieser Verzerrung zum Opfer als wir denken – und zwar nicht nur bei Wolkenbildern. Wir sehen nämlich auch dann Muster, wenn überhaupt keine existieren. Wie zufällig passen dann alle Daten in unseren Business-Case. Die oben gezeigte Sequenz ist rein zufällig. Warum aber fühlen wir uns in der Lage, aus dieser kleinen Datenmenge die Zukunft vorherzusagen? Unser Verstand verwendet Muster dazu, um daraus Entscheidungen abzuleiten. Dementsprechend neigen wir dazu, in Datenströmen auch dann Muster zu erkennen, wenn gar keine da sind, oder ganz elegant alles das auszublenden, was nicht zu unserer Theorie passt. Das Gesamtbild neutral zu betrachten, ist der Schlüssel zum Erfolg. Überprüfen Sie daher ganz bewusst bei Ihrer nächsten Entscheidungsfindung, ob Sie auch diejenigen Daten berücksichtigt haben, die nicht passend scheinen und Ihrer Idee widersprechen.

RÜCKBLICK

- 4/22 Luangwa – das Tal des Leoparden
 4/22 Alles Bastarde
 4/22 Wenn das Mikrobiom den Nerven trifft
 4/22 Funktionale Konvergenz des Oxylin-Signalling
 4/22 Der Bärensee in Siebenbürgen
 4/22 Invasive Neophyten in Deutschland
- 1/23 Räuberische Pilze mit Potenzial zur Schädlingsbekämpfung
 1/23 Letzte Chance für die Albatrosse
 1/23 Kampf der Zellen
 1/23 „Der See im Glase“
 1/23 Auf den Zahn gefühlt
 1/23 Ein Königreich in vielen Variationen
 1/23 Evaluation eines Berufsfeldpraktikums

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen und dgl. in dieser Zeitschrift berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Namen ohne weiteres von jedermann benutzt werden dürfen. Vielmehr handelt es sich häufig um gesetzlich geschützte eingetragene Warenzeichen, auch wenn sie nicht eigens als solche gekennzeichnet sind. – **Alle Rechte vorbehalten**, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Nur für den persönlichen und sonstigen eigenen Gebrauch sowie für nicht kommerzielle Zwecke dürfen von einzelnen Beiträgen oder Teilen von ihnen einzelne Vervielfältigungsstücke hergestellt werden. Der Inhalt dieses Heftes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber, Redaktion und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

BiuZ 3/2023 erscheint im August 2023

Biologie in unserer Zeit
 finden Sie im Internet unter
www.biuZ.de

Hat Ihnen dieses Heft gefallen, aber Sie sind noch kein VBIO-Mitglied?

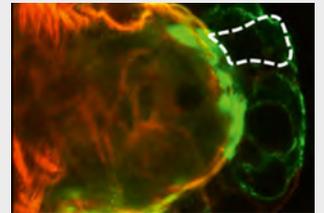
Die BiuZ gibt es exklusiv für VBIO-Mitglieder.
 Einfach beitreten unter www.vbio.de/beitritt
 und viermal im Jahr die Lektüre genießen!



IM NÄCHSTEN HEFT

Multitasking in Epithelmuskelzellen

Epithelien grenzen bei den Eumetazoen Gewebe und Organe nach außen oder innen hin ab. Bei Nesseltieren übernehmen Epithelzellen als Epithelmuskelzellen zusätzlich die Funktion einer Muskulatur. Wie die beiden Funktionen innerhalb der Hydra-Epithelmuskelzelle kontrolliert werden, ist ein schönes Beispiel für subzelluläre Kompartimentierung von Signalwegen.

**Bedeutung des Molybdän-Stoffwechsels**

Das Element Molybdän führt in der öffentlichen Wahrnehmung ein Aschenputtel-Dasein. Dabei ist es in der Biologie von eminenter Bedeutung, angefangen von den einfachsten Bakterien bis hin zum Menschen. Es spielte auch in der Evolution eine große Rolle: Ohne Molybdän gibt es kein höheres Leben!

22	23	24	25	26	27	28	29
Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
40	41	42	43	44	45	46	47
Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag
72	73	74	75	76	77	78	79
Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au
102	103	104	105	106	107	108	109
Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg
87	88	89	90	91	92	93	94
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd
89	90	91	92	93	94	95	96
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm

Pflanzliche Milchalternativen

Der Konsum von Milch trägt in hohem Maße zu den derzeitigen Umweltproblemen bei. Pflanzliche Produkte könnten eine nachhaltige und gesunde Alternative darstellen. Unser Artikel beleuchtet alle Aspekte rund um pflanzliche Milchalternativen einschließlich der Frage, inwieweit diese von den Konsumenten angenommen werden.



Foto: MurzikNata über iStock.

Virale Proteasen anschaulich erklärt

Die Corona-Pandemie hat Viren und Möglichkeiten zu ihrer Bekämpfung in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Mit wenigen handelsüblichen Utensilien lassen sich die Rolle der Virus-Proteasen und die Wirkung von antiviralen Protease-Inhibitoren leicht verständlich, anschaulich und unterhaltsam im Biologieunterricht erklären.

**Alles rund ums Studium**

Im September begrüßt der VBIO erneut die Studienanfänger/-innen mit der neuen BiuZ-Ausgabe. In der Rubrik Politik und Gesellschaft beschäftigen sich Studierende unter anderem mit der Vereinbarkeit von Ehrenamt und Studium, den Chancen und Hürden externer Abschlussarbeiten und der Geschichte der Bundesfachschäftentagung (BuFaTa) Biologie.





Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM
FÜR DIE**

BIEWISSENSCHAFTEN

Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten.
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie



www.vbio.de

Jetzt beitreten!

